

Energiatehnoloogia instituut

**AHJU KÜTMISEL TEKKIVATE GAASILISTE
ÕHUEMISSIONIDE UURIMINE**

**INVESTIGATION OF GASEOUS AIR EMISSIONS FROM
FURNACE HEATING**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Henry Kaljusmaa

Üliõpilaskood: 203961MASM

Juhendaja: Oliver Järvik, vanemteadur

Tallinn 2022

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....."05..... 2022.....

Autor: Henry Kaljusmaa

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 202.....

Juhendaja: Oliver Järvik

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

"....."202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ allkirjastatud digitaalselt /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Henry Kaljusmaa (*autori nimi*) (sünnikuupäev: 20.01.1998)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Ahju kütmisel tekkivate gaasiliste õhuemissioonide uurimine,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Oliver Järvik,

(juhendaja nimi)

- 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

- 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

/ allkirjastatud digitaalselt /

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Henry Kaljusmaa, 203961MASM (nimi, üliõpilaskood)

Õppekava, peeriala: MASM02/18- Energiatehnoloogiajasoojusenergeetika (kood ja nimetus)

Juhendaja(d): Vanemteadur, Oliver Järvik, 6203909 (amet, nimi, telefon)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Ahju kütmisel tekkivate gaasiliste õhuemissioonide uurimine

(inglise keeles) Investigation of Gaseous Air Emissions from Furnace Heating

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Mõõta ahju kütmisel tekkivaid gaasilisi heitmeid
2. Uurida inimese valitud ahju kütmis meetoodika mõju õhuheitmete hulgalet
3. Uurida õhu emissioonide erinevust kasutades erinevaid puu liike

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Läbi viia katsed ja koondada andmed	Jaauuar 2022
2.	Andmete töötlus, täiendavad arvutused ja andmete analüüs	Märts 2022
3.	Magistri töö teoreetilise ja eksperimentaalse osa kirjutamine	Aprill 2022

Töö keel:Eesti keel... **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "27"05.2022a

Üliõpilane: ...Henry Kaljusmaa.. ".....".....2022a

/ allkirjastatud digitaalselt /

Juhendaja: ...Oliver Järvik... ".....".....2022a

/ allkirjastatud digitaalselt /

Programmijuht: ... Eduard Latõšov..... ".....".....2022a

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	7
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	8
SISSEJUHATUS	10
1 BIOMASS	11
1.1 Biomassi kasutus Euroopas.....	11
1.2 Biomass Eestis.....	15
1.3 Biomassi energeetilise kasutamise eelised ja puudused	15
1.4 Biomassi põletamise tehnoloogiad	16
1.4.1 Restahjud.....	18
1.4.2 Alattoite koldega katlad	18
1.4.3 Restkoldega katlad	18
1.4.4 Keevkihtkatlad	19
1.5 Puidu põletamine ja tekkivad tahkete osakeste heitmed	19
1.6 Puidu põletamisel tekkivad gaasilised emissioonid	21
1.7 Puidu põlemise etapid ja nendega kaasnevad emissioonid	26
1.8 Nõuded ahjudele	27
2 METOODIKA JA KATSEANDMETE KOGUMINE	31
2.1 Kasutatud katseahi	33
2.2 FT-IR suitsugaaside koostise määramiseks	35
2.3 Temperatuuri mõõtmine.....	36
2.4 Arvutused mõõtetulemustest lõpp-tulemuste saamiseks.....	37
2.4.1 Mõõtemääramatuse arvutamine	38
3 AHJU KÜTMISE KATSETE TULEMUSTE KIRJELDUS JA VÕRDLUS	39
3.1 Lepaga külma ja kuuma ahju kütmise võrdlus.....	39
3.2 Kuusega külma ja kuuma ahju kütmise võrdlus.....	45
3.3 Lepaga ja kuusega külma ahju kütmise võrdlus.....	52
3.4 Külma ahju lepaga kütmise võrdlus alumise põlemisõhu ava avatuse järgi	59
3.5 Ülejäänud katsete võrdlus ja märkimisväärsemate tulemuste analüüs.....	62
3.5.1 Süütekatsed süütetableti ja ajalehega.....	62
3.5.2 Lepaga kütmise katsed põlemisfaasi lõpus 2 või 4 halu lisamisega.....	63
3.5.3 Süütekatsed ülevalt ja alt süütamisega	64
3.5.4 Lepaga ja kuusega kuuma ahju kütmise võrdlus	66
3.5.5 Külma ahju lepaga kütmise katsete võrdlus, kus tuharest on täiesti lahti või kinni.....	68
3.6 Järeldused katsete tulemustest	70
KOKKUVÕTE	77
SUMMARY.....	79

KASUTATUD KIRJANDUS	81
Lisa 1 Alapeatükis 3.4 kirjeldatud katsete tulemused	84
Lisa 2 Alapeatükis 3.5 kirjeldatud katsete tulemused	88

EESSÕNA

Käesolev magistritöö uurib ja annab ülevaate ahju kütmisel tekkivatest õhuemissioonidest. Katsete käigus mõõdeti seitset levinumat gaasilist saasteainet, mis põlemisel tekivad: NO_x, SO₂, CO, NH₃, CH₄, TOC ja LOÜ. Lisaks saasteainete koguste mõõtmisele proovitakse ka võrrelda erinevate kütismetoodikate mõju nende tekkimise hulgalet. Teostati kokku 33 katset, kus tehti mitmeid metoodilisi muudatusi: muudeti kütuseks kasutatava puuliiki, põlemisõhu ava asendit, tuharesti asendit ja sellega õhu liikumist koldesse, kasutati erinevat süütematerjali ja köeti külma ja eelkõetud ahju. Fourier' teisendusega infrapunaspetskoopia abil koguti andmed katsetes kolme faasi kohta, milleks on süütamis-, põlemis- ja kustumisfaas ning arvutati neile saasteaine keskmised masskulud. Samuti tuuakse töös välja katsefaaside emissiooni kogumassid ja tekkinud emissiooni kogus kg kütuse kohta.

Tänuavaldus on suunatud Tallinna Tehnikaülikooli inseneriteaduskonna energiatehnoloogia instituudi vanemteadurile ja käesoleva magistritöö juhendajale Oliver Järvikule, kes aitas kaasa magistritöö teema sõnastamisel, algandmete koondamisele ning analüüsi arvutuste teostamisel ja vastas kõigile magistritööga seotud küsimustele. Avaldan tänu ka Tallinna Tehnikaülikooli inseneriteaduskonna energiatehnoloogia instituudi professor Alar Konistile, kes samuti aitas kaasa magistritöö teema sõnastamisel ja eesmärkide seadmisel.

Märksõnad: gaasilised õhuemissioonid, puitkütus, ahi, õhukvaliteet, magistritöö.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

BaP - Benso[a]püreen on polütsükiline aroomaatne süsivesinik, mis on orgaanilise aine mittetäieliku põlemise tulemus (ingl k Benzo[a]pyrene)

BFB - mulliva keevkihiga katel (ingl k bubbling fluidized bed boiler)

CFB - tsirkuleeriva keevkihiga katel (ingl k Circulating fluidized bed boiler)

EEA - Euroopa Keskkonnaagentuur (ingl k European Environment Agency)

ELV – emissiooni piirväärtused (ingl k Emission Limit Values)

FT-IR - Fourier' teisendusega infrapunaspetskoopia, eelistatud infrapunaspetskoopia meetod (ingl k Fourier-transform infrared spectroscopy)

IEA - Rahvusvaheline Energiaagentuur (ingl k International Energy Agency)

ISPRA - Itaalia Keskkonnakaitse- ja Uurimisinstituut (ingl k The Italian Institute for Environmental Protection and Research)

LOÜ – lenduvad orgaanilised ühendid (ingl k Volatile organic compounds)

MCE – muudetud/täiendatud põlemise efektiivsus (ingl k Modified combustion efficiency)

Mtoe – miljonit või megatonni naftaekvivalenti (ingl k million or mega tonnes of oil equivalent)

NO_x - üldnimetus lämmastikoksiidide kohta, mis on õhusaaste seisukohalt kõige olulisemad, nimelt lämmastikoksiid ja lämmastikdioksiid

OGC – orgaaniline gaasiline süsinik (ingl k organic gaseous carbon)

oTT – ametlik ahjutüüp testimis meetod

PAH - polütsükliised aroomaatsed süsivesinikud (ingl k Polycyclic aromatic hydrocarbons)

PM 1 – lenduvad tahked osakesed, mille diameeter on alla 1 mikromeetri

PM 10 – lenduvad tahked osakesed, mille diameeter on alla 10 mikromeetri

PM 2,5 – lenduvad tahked osakesed, mille diameeter on alla 2,5 mikromeetri

ppm – miljondikosa (ingl k parts per million)

PRTR -saasteainete heite- ja ülekanderegister (ingl k A pollutant release and transfer register)

STTV - Soome Sotsiaal- ja tervisetoodete kontroll (ingl k National Product Control Agency for Welfare and Health)

TOC - orgaanilise süsiniku kogus (ingl k Total organic carbon)

WHO - Maailma Terviseorganisatsioon (ingl k world health organization)

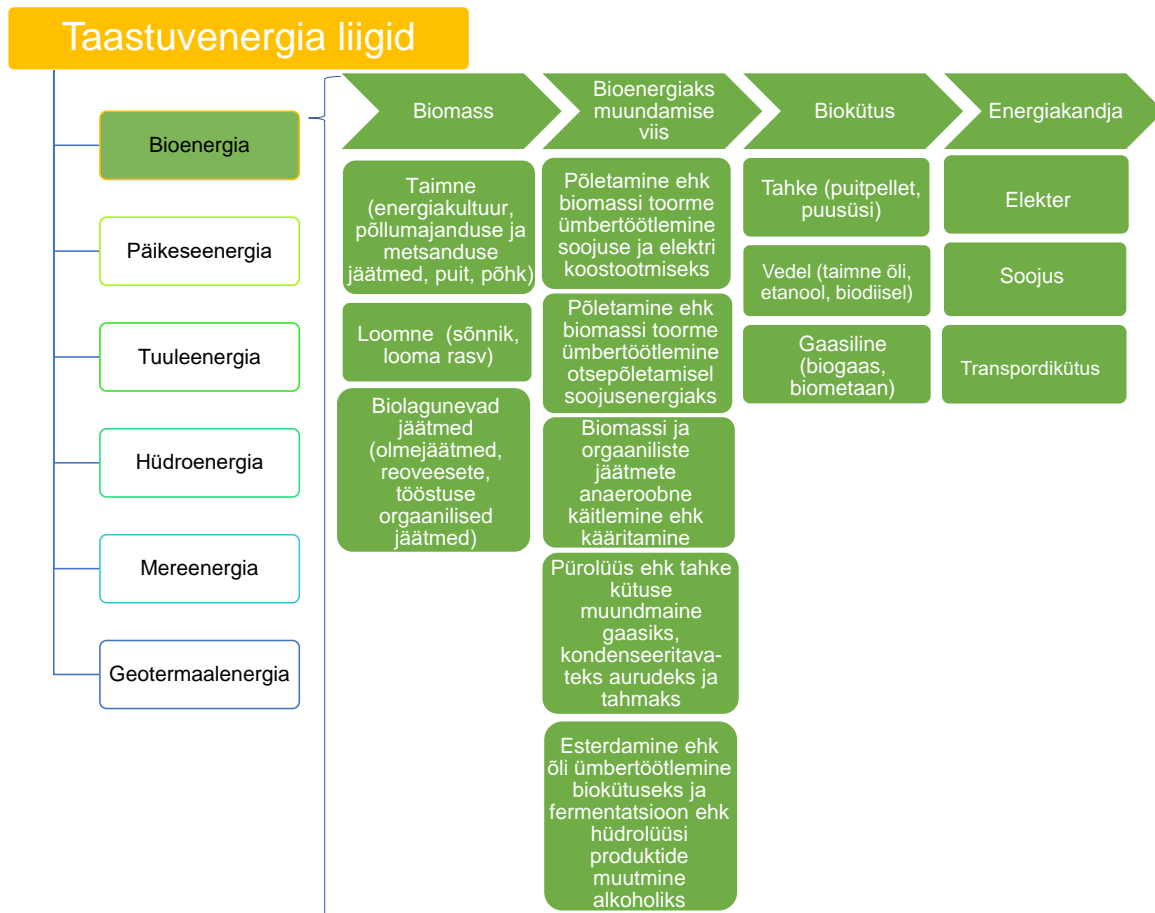
SISSEJUHATUS

Tänapäeval on suure tähelepanu alla sattunud kliima soojenemine ja muud inimtekkelised keskkonnamõjurid. Tänu sellele on hakatud tähelepanu pöörama energeetikasektori niiöelda rohelisemaks muutmisele taastuvate energiaallikatega ja fossiilsete kütuste biokütustega asendamisega. Biomassi kasutamine kütusena on aga tekitanud küsimusi, kas peaks rohkem tähelepanu pöörama tema kasutamisel tekkivatele õhuemissioonidele ja kui täpselt on võimalik võrrelda seda tema loodusliku lagunemisega. Algselt oli huvi eelkõige suurtes põletusseadmetes väljuvate suitsugaaside vastu, aga see huvi on laienenud ka väikeste põletusseadmete vastu, näiteks ühepereelamu kodune ahi. Põletusseadmete õhuemissioonid jagunevad kaheks. Esimene grupp on lenduvad tahked osakesed PM 10; PM 2,5 ja PM 1, mis on otseselt kahjulikud inimese tervisele. Teine grupp on lenduvad gaasilised ühendid, mis on kahjulikud nii inimestele kui ka keskkonnale, nende ohtlikkuse tase aga on igal konkreetsel ühendil erinev. See uurimistöo keskendub just lenduvate gaasiliste ühendite uurimisele ahju kütmisel võimalikult reaalsetes ja elulistest oludes. Põlemisgaasides mõõdeti järgmiste gaasiliste saasteainete kontsentratsioone: NO_x, SO₂, CO, NH₃, CH₄, TOC ja LOÜ Enamus nendele saasteainetele on kaasaegsete ahjude tootjad andnud piirväärtused, millest nende ahjude kütmisel tekkivad emissioonid peaksid väiksemad olema. Need väärtused on saadud aga laboratoorsete katsete tulemusena ja juba esimesed mõõtmised reaaloludes on näidanud, et emissioonid on kindlasti kõrgemad tavaoludes. On tehtud ka mitmeid modelleerivaid arvutusi piirkondades, kus asub suur kontsentratsioon ahjuküttega elamuid ja nende piirkondade õhukoostise mõõtmised, eriti just külmadel perioodidel on näidanud õhus nende emissiooniainete kontsentratsioonide märgatavat tõusu.

Selle uurimistöo raames kasutati katsete läbiviimiseks Tulikivi ahju TU 1000/50 ja suitsugaaside koostist mõõdeti FT-IR seadmega. Katseteks kasutati kaht eestimaist puuliiki lepp ja kuusk. Katsete esmane eesmärk on kujutada kodusel ahjukütmisel reaalsetes oludes õhuemissioonide koguste mastaapi kõigil seitsmel mõõdetud ühendil. Teine eesmärk on erinevaid kütmissmeetodeid kasutades võrrelda, kui palju need emissioonide mastaabid võivad katsegrupiti kõikuda, ja kas on nii öelda õigeid ahjukütamise meetodikaid, mida järgides emissioonid arvestatavalt vähenevad. Katsetulemuste võrdlemisel jagati kogu kütmisskatse kolmeks perioodiks: süütamis-, põlemis- ja kustumisperiood. Katsete tulemused, mis saadi algselt ppm-ides on ümberarvutatud, et kujutada perioodide emissioonide voogu mg/s. Lisaks sai arvutatud perioodides eraldunud kogu emissiooni mass ja katse konkreetse emissiooniühendi kogu emissioon ja eriemissioon mis tekkis kg kütuse kohta.

1 BIOMASS

Bioenergia on biomassist toodetud energia, mis on üks taastuvenergia liikidest, millest energia tootmine sarnaneb fossiilsete kütuste põletustehnoloogiaga. See on biomassi kasutusele nii eelis kui ka puudus. Bioenergia toormematerjaliks on taimne ja loomne biomass ning biolagunevad jäätmed. Bioenergia olemust kujutab hästi Joonis 1.1.



Joonis 1.1 Bioenergia ahela skeem [1]

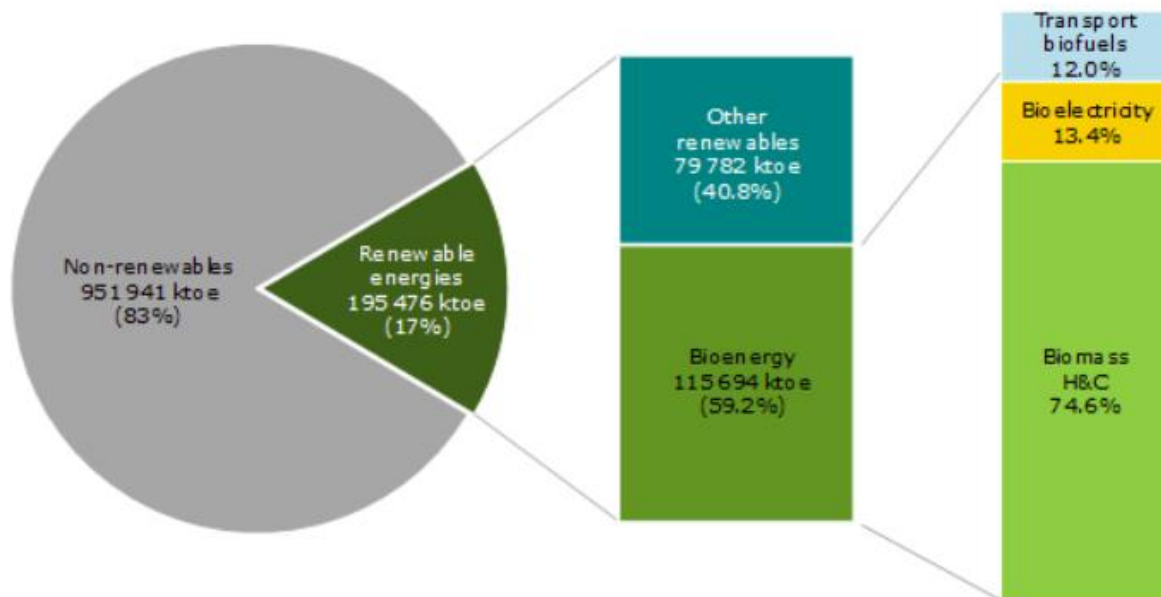
Bioenergia tootmist ja kasutamist võivad mõjutada mitmed majanduslikud, sotsiaalsed, poliitilised ja ökoloogilised aspektid. Investeerimisvajadus bioenergia tootmiseks ja kasutamiseks võib tekkida mitmetest aspektidest, aga vajadus selle järele rohepöörde kontekstis aina kasvab [1].

1.1 Biomassi kasutus Euroopas

Elektri jaamades biomassi põletamist on maailmas senini loetud keskkonnasõbralikuks tegevuseks. Vastupidiselt fossiilkütustele arvatakse biomassi CO₂ heitmed olevat kliima suhtes neutraalsed, sest biomassi põletamise käigus eralduv CO₂ on eelnevalt atmosfäärist taimed sidunud orgaanilistesse molekulidesse, nagu näiteks tselluloos ja ligniin. Seepärast

ei vii biomassist eralduvad CO₂ heitmed globaalset kasvuhoonegaaside taset tasakaalust välja, võimaldades biomassi energiaallikana kasutatavate tehnoloogiate rakendamist [2]. Hiljutised uuringud aga on näidanud, et see lähenemine võib kasvatada Eesti CO₂ heitmeid, seades kahtluse alla selle kliimasõbralikkuse. Kui metsa targalt majandada, ei pruugi suurem puidupõletamine Eesti metsi kahjustada, kuid teiste riikide kogemustest õppides ei saa arvata, et kütusevajaduse katmiseks piisab vaid raie- ja puidujääkidest, leiavad teadlased. Samuti tuleb arvestada, et puidujääkide kasutamine ei ole sama efektiivne ja samade emissioonidega nagu näiteks küttepuu/halgude kasutamine. "Biomassi põletamisest on saanud mitmete Euroopa riikide jaoks CO₂ heitmete vähendamise plaani oluline osa. Kuid see otsus on paljuski poliitiline, sest teaduslikust vaatenurgast pole võimalik veel kindlalt väita, kui palju seeläbi süsinikku õhku paisatakse ja mis ajaks taimed suudavad selle uuesti atmosfäärist eemaldada," tõdes Laurent Augusto, Prantsusmaa riikliku põllumajandusuuringute instituudi teadur. Saadavad tulemused sõltuvad tugevalt mudelites tehtavatest eeldustest, mis omakorda on tugevalt mõjutatud kohalikest eripäradadest, tööühmade eelhoiakutest, tegurite lihtsustamisest ja tulemuste varieeruvuse keskmistamistest [3]. Viimasel ajal tehtud biomassi-kriitilised uuringud on pannud Euroopa Liitu uurima tehnoloogiate arendamist ja kasutamist, mis võimaldaks saavutada negatiivseid CO₂ heitkoguseid. Näiteks bioenergia kasutamine koos süsiniku püüdmiss- ja ladustamistehnoloogiaga aitaks oluliselt vähendada kasvuhoonegaaside õhku paiskamist [4].

Rahvusvahelised kliimalepped näevad Euroopa Liidus bioenergiat süsinikuneutraalsena ehk nende järgi puidu põletamine ei suurendagi CO₂ emissiooni, kuna on seotud loodusliku süsinikuringlusega. Seejuures ei tehta vahet, kui kaua aega võtab põletamisel vallanduva süsiniku sidumine looduses. Kui näiteks kõrrelised ja vitshirss võivad kasvada tagasi juba järgmisel aastal, võib võtta metsades süsinikuvarude täielik taastumine 50–100 aastat. Senikaua põhjustab kütuse põletamisel tekkinud CO₂ kliima muutust täpselt samal viisil kui fossiilkütuste heitmed. Vastuolu puidupõletamise CO₂ heitme osas ulatub 1997. aastal sõlmitud Kyoto protokoll. Arvepidamise hõlbustamiseks tuli selle raames süsinikuheitmed kirja panna metsa raiumisel, kuid mitte puitmaterjali põletamisel. Juhised toimivad eesmärgikohaselt ühe riigi piires, ent jäävad hätta üleilmsete kaubavoogude arvestamisega. Euroopa Liidu taastuvenergeetika saavutamise plaanides on biomassist toodetav energia olnud tähtsal kohal juba mitmeid aastaid, nagu iseloomustab järgnev Joonis 1.2.



Joonis 1.2 Taastuvenergia osakaal EL-i energiatarbimises 2016. aastal ja bioenergia panuse jaotus [4]

Tänu Euroopa Liidu soosingule fossiilkütuste asendamisele biomassiga on EL-i taastuvenergeetika direktiivi raames piiriülese puidukaubanduse maht oluliselt kasvanud. Viimase viie aastaga on saadetud ainuüksi USA-st Euroopa Liitu enam kui seitse miljonit tonni puidugraanuleid. Eesti eksporditava küttepuidu koguväärtus on kasvanud viimase kümne aastaga enam kui kolm korda, ulatudes 2018. aastal peaaegu 220 miljoni euroni. Euroopa Liitu saadeti erineval kujul ligi 1,8 miljonit tonni küttepuitu [3].

Euroopa Komisjoni üks uuemaid 2021. aasta kliimapakett näeb ette, et riigid väärindaksid puitu ja hoiduksid selle põletamisest elektrijaamades. Kuigi komisjon otseselt biomassi kasutamist elektritootmisel ei keela, on pakett siiski tekitanud soovi puidurikastes riikides nagu Soome, Rootsi ja Eesti, et biomassi saaks energia tootmisel senistel alustel edasi kasutada. Euroopas võrdsustati 1990. aastatel taastuvenergia tootmise mõttes puidu põletamine tuule- ja päikeseenergiaga. Avaldatud kliimapaketi järgi soovib Euroopa Komisjon keelata kõrge elurikkusega metsadest pärineva biomassiga energia tootmise. Lisaks tuleb puitu väärindada võimalikult kõrgel tasemel ja bioenergia on väärinduse seisukohast viimasel kohal. Metsarikkad riigid, nagu Soome ja Rootsi ning Baltimaad aga soovivad, et metsamaterjali kasutamisele energia tootmiseks rangemaid piiranguid ei kehtestataks. Näiteks Eesti majandus- ja kommunikatsiooniministeriumi asekancler Timo Tatar avaldas arvamust, et kui oleme veendunud, et meie metsamajandamine on säästlikult ja jätkusuutlikult tehtud, siis seal on ka roll bioenergiast. Majandusminister Taavi Aasa sõnul kliimapakett Eesti jaoks ei keela, aga tuleb arutada punkte mis takistavad kändude ja juurikate energeetilist kasutamist ja samuti tuleb seista selle eest, et riigid, kus biomassi on vähe ja seda energeetiliselt ei kasutata, ei otsutaks biomassi

kasutuse vajaduse ja lubamise üle. Metsarikkad riigid nõuavad, et biomass peab jääma taastuvenergia direktiivi järgi energia tootmise allikaks [5].

Puidutöösturite sõnul pole Eestis keemilist puidu väärindamist, nagu näiteks tselluloositehast. Seetõttu jääbki metsast üle palju materjali (biomassi), millega pole peale põletamise Eestis midagi peale hakata. Metsa- ja puidutööstuse liidu tegevjuht Henrik Välja kirjeldas Eestis raiutava metsa kasutust, nii et 40%, mis lõigatakse on palk, 25% on paberipuu ja 35% on küttepuu. Kui võtta võrdluseks Soome numbrid, siis seal on umbes 40% palk, umbes 50% paberipuu ja ainult 10% küttepuu. Seni kuni meil sellist turu jaotust metsandusproduktidele pole, on mõistlik toorainet kasutada kohalikuks soojatootmiseks, elektritoomiseks ja kui võimalik, siis koostootmiseks [5].

Tahke biomassi põletamine on vanim ja küpseim biomassi termokeemilise muundamise tehnoloogia maailmas ja Euroopas kõige levinum taastuv energiaallikas. Suurem osa 2016. aasta 98,4 Mtoe tahke biomassi brutotarbimisest Euroopas kasutati kütteks. Küte biomassi põletamisega kateldes ja ahjudes moodustas EL-28 riikides 2015. aastal 82,9 Mtoe, mis on 7,5% kogu energia lõpptarbimisest ja peaaegu pool taastuvate energiaallikate kogutarbimisest. Kuigi puitahjud on vähem mugavad kui automaattoitega katlad, on need madala kütusekulu ja leegi poolt tekitatava mugavustunde tõttu väga populaarsed. Puuhaluahjudel on aga mittetäieliku põlemise heitgaasid, mille kogus on oluliselt suurem kui suitsugaaside puhastuseseadmetega ja automaatjuhtimissüsteemidega automaatsetel kateldel [6].

Viimastel aastatel on elamutes puidupõletus muutunud paljudes arenenud riikides peamiseks väliskeskkonna tahkete osakeste (PM) allikaks ja mõnes neist riikidest isegi suurimaks esmaste osakeste heitkoguste allikaks. Kui teisi tahkete osakeste allikaid on viimastel aastakümnetel intensiivselt reguleeritud, on elamute puidu põletusseadmed reguleeritud vaid vähesel määral, hoolimata selle mõjust kliimale ja tervisele. Sellest tulenevalt on piirkonnad nagu Euroopa, Põhja-Ameerika ja Austraalia, hakanud rohkem uurima, kuidas vähendada elamutes puidupõletamisel tekkivat PM heidet ja ka muude emissioonide vähendamise võimalusi. Sellel teemal on ilmunud viimasel ajal mitmeid teadusartikleid ja ahjude ning teiste kütteseadmete tootjad on standardite järgi välja töötanud uusi efektiivsemaid mudeleid [7]. Loogika, et fossiilkütuste asemel puidu põletamist soodustava kliimapolitika tõttu nimetada puidu põletamist "puhtaks" või "rohelisteks" ja öelda, et see on säästlik ja looduslik energiaallikas on tekitanud uue olukorra Euroopas. Koos kasvavate energiakuludega on arenenud riikides viimase paarikümne aasta jooksul kasvanud puidu põletamine kodukütteks. Nii kasvas aastatel 2007–2017 ainult Euroopas taastuvenergia kogus (lokaal- ja kaugküte) 64%, kusjuures puit ja tahkekütused moodustasid 42% PM osakeste tekkest. Seetõttu on elamute puidu küte üks suurimaid õhus lenduvate tahkete osakeste allikaid Euroopas, domineerides primaarsete PM10 ja

PM2,5 heitmetes, millele järgneb tööstus ja transport. Lisaks selle tekib elamutes puidupõletusest Euroopas 53% Polütsükliliste aromaatsete süsivesinike (PAH) ja 72% Benso[a]püreeni (BaP) heitkogustest [7].

1.2 Biomass Eestis

Eesti oludes võib energeetilise biomassina kasutada põhiliselt puit- ja kõrstaimi ja nende jäätmeid. Saamisallikate järgi jaotatakse biomassi enamasti kolmeks: puidu (metsa), põllumajanduslikuks ja tööstusliku jääkproduktina tekkivaks biomassiks. Kuigi erineva päritoluga biomassil on põhimõtteliselt sarnased omadused ja koostis, on olulised erinevused energia- ja tuhasisalduses ning kütteväärtuses. Ülemine kütteväärtus oleneb olulisel määral niiskusesisaldusest, mis on enamasti biomassi toormes kõrge ja mida on mõistlik vähendada biomassi põletamiseelse kuivatamisega [2]. Bioenergia tootmist ja kasutamist mõjutavad mitmed majanduslikud, sotsiaalsed, poliitilised ja ökoloogilised aspektid. Neid uuris Eesti Maaülikool 2015. aastal läbi viidud küsitlusuuringus. Küsitlusest selgus, et enam kui poolte ettevõtjate investeerimisvajadus bioenergia tootmiseks ja kasutamiseks oli tingitud pigem majanduslikest aspektidest nagu konkurentsivõime säilitamine või selle parandamine ja tootmiskulude vähendamine. Oluliseks pidasid ettevõtjad ka energeetiliselt sõltumatu olemist ehk toota energiat endale ise ning elavdada majandustegevust maapiirkonnas läbi uute töökohtade loomise. Üllatavalt vähe mõjutasid bioenergia tootmise ja kasutamise otsust ettevõtjate hinnangul ökoloogilised aspektidid ja poliitilised vaated. Ligi poolte (48%) ettevõtjate hinnangul eelistatakse bioenergia arendamist teiste taastuvate energialiikide arendamisele ning poolte (50%) ettevõtjate hinnangul seisnes investeerimise põhjus riigipoolsete toetuste võimaluse kasutuses [1].

Puitkütusena saab Eestis teoreetiliselt kasutada halupuitu, hakkpuitu, puitbriketti, puidupelleteid, puusütt, puugaasi, puidujäätmeid ja energiavõsa. Põllukultuuride valik aga on Eesti kliimas väiksem, nendeks on raps, millest võib toota bioõli, mitmeid söödavilju saab töödelda bioetanooliks ning lõpuks saab enamus põllukultuuride koristus- ja töötlusjääke kasutada energeetiliselt kütusena. Lisaks põllukultuuridest saadavale biomassile on Eestis ka potentsiaal paaril looduslikul kultuuril, nendeks on pillroog ja hundinui. Need taimed kasvavad loodulikel märgaladel, aga on uuritud, et kunstlikel märgaladel võib nende tootlikus olla kahekordne võrreldes loodusliku kasvukohaga. Seetõttu peetakse võimalikuks tulevikus Eestisse isegi umbes 0,1 mln ha kunstlike märgalade rajamist kuhu tulevad hundinuiad istandused [8].

1.3 Biomassi energeetilise kasutamise eelised ja puudused

Biomassi kasutamist Eestis ja selle potentsiaali on uuritud juba mitmeid aastaid ja see on ka leidnud kasutust mitmetes uutes koostootmisjaamades. Biomassi kasutamisel on aga

omad plussid ja miinused nagu selgub Majandus ja kommunikatsiooniministeeriumi poolt tellitud uuringus nimega „Kütuse- ja energiamajanduse riikliku pikaajalise arengukavavstrateegilise keskkonnamõju hindamise aruanne“. Aruandest tuli välja, et plussid kaaluvad kindlasti üle miinused, aga siiski ka miinused on arvestatavad. Biomassi kasutamise plussid jagunesid kolmeks peamiseks valdkonnaks. Esiteks keskkonnasõbralikkus – biomassi põletamisel tekkiv CO₂ emissioon on teatud piirideni osa looduslikust süsinikuringlusest. Biomassi eeliseks fossiilsete kütuste ees on, et jääb vähem tahkeid põlemisjääke, tekib suhteliselt vähe väevliühendite ja raskemetallide emissioone, puidujäätmeid tekib igal juhul metsamajandamisel ja puidu töötlemisel. Teiseks majanduslik kasu – väheneb sõltuvus fossiilkütustest, mida peab importima teistest riikidest, seejuures tasakaalustades riigi välismajandusbilanssi, kodumaise kütuse hind on paremini reguleeritav kui välismaise kütuse hind, Eestis on olemas kasutusest väljas olevat põllumajanduseks sobivat maad, puitkütuse varumine suurendab hooldusraiete tegemist, mis omakorda tõstab metsade kvaliteeti ja kindlustab Eesti tööstuse kvaliteetse toorainega. Kolmas pluss on maaelu areng – biomassi varumine ja kasutamine parandab tööhõivet maakohtades ja aitab neil piirkondadel majanduslikult areneda [8].

Ka miinused jagunevad põhiliselt kolmeks valdkonnaks. Esiteks kulukus – biomassil töötavate koostoomisjaamade rajamiskulud on vahemikus kolm kuni viis korda kallimad, kui sama võimsusega maagaasi koostootmisjaama rajamine, samuti on kõrged kulud loodusliku biomassi kasutusele võtuks, eelkõige pilliroog ja hundinuiad, kallid on ka rajada energiataimede põldusid, samuti on tähtis energiataimede põldude rajamisel arvutada ja jälgida äratasuvat veokaugust. Teiseks on biomassi kasutamisel ka omad keskkonnaprobleemid – toitelementide väljaviimine metsast, suurenev liikluskoormus teedel ja raskeveokite transpordimüra, metsatööd segavad lindude kevadist ja suvist pesitsusperioodi, energiavõsa kasvatamine ei erine sisuliselt teiste monokultuuride kasvatamisest ja see sarnaselt panustab veekogude reostumisse ja eutrofeerumisse. Kolmas miinuste valdkond on riigipoolne vajalik panus – puitkütusena kasutatav ressurss on otseses sõltuvuses riiklikest raiemahtudest ja keskkonnakaitselistest piirangutest, biomassi energeetika vajab kindlasti algusfaasis riigi toetusi ja ilmselt ka reguleerimist [8].

1.4 Biomassi põletamise tehnoloogiad

Otsepõletamine on kõige tuntum ja enimkasutatav tehnoloogia biomassi muundamiseks soojuseks. Põlemise ajal põletatakse biomassi õhu liiaga (liigõhuteguriga), et toimuks võimalikult täielik põlemine ja toodetaks suurima kasuteguriga soojust. Põlemise esimene etapp hõlmab põlevate gaaside ja lendosade eraldumist biomassist, mis põlevad leegis. Jääkmaterjal, mis on söe kujul ja hõõgub, põletatakse sundõhu voos, et põlemistemperatuuri tõsta. Kuumasid põlemisgaase kasutatakse mõnikord otse biokütuse kuivatamiseks, kuid enamasti juhitakse need läbi soojusvaheti, et toota rohkem kasulike

saadusi nagu kuum õhk, kuum vesi või tööstulik aur. Põlemise efektiivsus sõltub väga suures osas heast kontaktist õhus oleva hapniku ja biomassi kütuse vahel. Biomassi efektiivse põlemise peamised lõpp-produktid on süsihappegaas ja veeaur, kuid eralduvad ka tõrvad, vingugaas ja leeliselised tuhaosakesed. Nende heitkoguste minimeerimine ja nende võimalike mõjude vähendamine on keskkonnasõbralike biomassi põletussüsteemide kavandamisel üks olulisemaid väljakutseid. Biomassi põletussüsteemid, mis põhinevad erinevatel ahjude konstruktsioonidel, võivad olla väga tõhusad kuumade gaaside, kuuma õhu, kuuma vee või auru tootmisel, saavutades tavaliselt kasuteguri vahemikus 65–90%. See näitab kui palju kütuse koguenergiast muundatakse kasulikuks energiaks. Madalam kasutegur on enamasti seotud kas märjema kütusega, erinevate biokütuste omadustega ja seotud põlemisnõuetega. Erinevate biokütuste kasutamiseks kasutatakse kogu maailmas mitmeid põletusahjude või põlemiskambrite konstruktsioone [9]. Arvestades biokütuste ja turba omaduste laia ulatust, on nende kütuste põletamiseks palju erinevaid tehnoloogiaid rakendatud:

- pulberpõletus – kasutatakse vähestel juhtudel, näiteks puidujahvatuspulbri koospõletamiseks koos vedelkütusega;
- restpõletustehnoloogiad on levinumad ja laia valiku resti konstruktsioonidega. Neid võib jagada automatiseerituse taseme järgi kaheks, fikseeritud või täisrestiga ja liikuva restiga konstruktsioon;
- põlemine keevkihis – kas mulliv või tsirkuleeriv keevkiht;
- kütuse gaasistamine ja põletamine õli- või gaaskütel töötavas katlas.

Teatud põlemistehnoloogia on kas tehniliselt või majanduslikult kõige otstarbekam teatud katla võimsuste vahemikus. Järgmisena toon välja kaks tabelit, millest esimene Tabel 1.1 iseloomustab erinevate biomassi põletustehnoloogiate sobilikke võimsusvahemikke ja Tabel 1.2, mis iseloomustab kütteseadmete võimsuseid sõltuvalt nende kasutuskohast [10].

Tabel 1.1 Põletustehnoloogia miinimum ja tüüpiline võimsusvahemik [10]

Põletustehnoloogia	Minimaalne võimsus, MW	Tavaline võimsus, MW
Liikumatu restiga ahi	0,01	0,05-1
Liikuva restiga ahi	0,8	2-15
Mulliva keevkihiga katel	1	>5
Tsirkuleeriva keevkihiga katel	7	>20
Kütuse gaasistamise seade	0,3	2-15

Tabel 1.2 Põletusseadmete võimsused nende erinevates kasutuskohtades [10]

Kasutusvaldkond	Tüüpiline võimsus
Ühepereelamu katel	15-40 kW
Suure hoone katel	40-400 kW
Kindla piirkonna kaugküttekatel	0,4-20 MW
Tööstuslik katel	1-80 MW
Olmejäätmete põletamise katel	10-30 MW

1.4.1 Restahjud

Restahjude tehnoloogiad on levinuimad keskmisel ja madalal võimsusvahemikul. Ajalooliselt restahjud on jagatud ahjudeks käsitsi või mehaanilise (automaatse) kütuse etteandega. Praegusel ajal osakaal käsitsi toidetavatel kateldel on muutunud väga väikeseks ja isegi ühepereelamutes üha rohkem uutest kateldest on varustatud automaatsete etteandesüsteemidega, aga käsitsi toitega ahjud ja kaminad ei kao kuhugi, kuna neil on oma sisekujunduslik võlu, lihtsus ja töökindlus inimestele, kes seda soovivad. Koos toitesüsteemi automatikaga on tihti ka tuha eemaldus automaatne, kuigi puitkütuste madala tuhasisalduse tõttu võiks kokkuhoiu eesmärgil ka käsitsi tuhaeemaldust aktsepteerida isegi üsna suurte katelde puhul. Kuna restahjude tehnoloogia on arenenud sajandeid, siis toon välja mõned liigid sellest suurest hulgast restitüübi alusel: tahke või fikseeritud rest; liikuv kaldrest; rändrest; spetsiaalsed restid konstrueeritud spetsiifiliste kütuste omaduste järgi, näiteks olmejäätmete põletamiseks [10].

1.4.2 Altoite koldega katlad

Selles konstruktsioonis juhitakse biomass põlemistsooni põletusresti alt. Need küttekehade konstruktsioonid sobivad ainult väikesemahuliste süsteemidele, mille katla nimivõimsus on kuni 6 MW_{th}, see on siiki oluliselt suurem näiteks elamu ahjude võimsusest, ja madala tuhasisaldusega biomassikütustele, nagu hakkpuit ja saepuru. Suure tuhasisaldusega kütused nagu puukoor, põhk ja teravili vajavad tõhusamaid tuhaeemaldussüsteeme. Kütusekihi ülemist pinda katvad paagutatud või sulatuha osakesed võivad ebastabiilsete põlemistingimuste tõttu tekitada probleeme altoitekütteil, kui kütus ja õhk tungivad läbi tuhaga kaetud pinna [9].

1.4.3 Restkoldega katlad

See konstruktsioon on kõige tavalisem biomassi katla tüüp. See põhineb restil, mis toetab kütusekihti ja segab kontrollitud koguse põlemisõhku, mis tihti siseneb resti alt. Ehitus mõne võrra sarnaneb estahjuga, aga võimsus on rest koldega katlal palju suurem.

Biomassi kütust lisatakse resti ühest otsast ja põletatakse kütusekihis, mis liigub kas raskusjõu või mehaanilise abiga järk-järgult allapoole resti teises otsas asuvasse tuhaemaldussüsteemi. Keerulisemate konstruktsioonide korral võimaldab see kogu põlemisprotsessi jagada kolmeks põhitegevuseks: kütuse esialgne kuivatamine, lenduvate koostisosade süttimine ja põlemine ning söe läbipõlemine. Restkolded on end hästi tõestanud ja töökindlad ning taluvad suuri erinevusi kütuse kvaliteedis (st niiskusesisalduse ja osakeste suuruse kõikumised) ning kõrge tuhasisaldusega kütuseid. Nende põlemisparameetrid on hästi kontrollitavad ja jälgitavad ning nende lihtsus ja tõhusus on tinginud nende laia leviku [9].

1.4.4 Keevkihtkatlad

Keevkihtpõletussüsteemi aluseks on inertsest mineraalset, näiteks liiv või lubjakivi, kiht. Selle kihi alt ja läbi selle kihi puhutakse õhku. Õhku puhutakse läbi kihi piisavas mahus ja piisavalt kõrge rõhuga, et kaasa haarata kihi materjali väikesed osakesed, nii et kiht ja puhutav õhk käituvad õigel temperatuuril sarnaselt vedelikuga. Keevkihtkatlaga elektrijaama põlemiskamber on kujundatud nii, et teatud kõrgusel langeb õhu kiirus allapoole osakeste kaasahaaramiseks vajaliku. See aitab hoida suuremat osa kaasavõetud kihimaterjalist kambri alumises osas. Kui kiht muutub kuumaks, süttib ja põleb sellesse sisestatud põlev materjal (biokütus) ja tekib kasulik soojus nagu tavalisemates ahjudes. Põlevmaterjali, näiteks biomassi osakaal kihis on tavaliselt vaid umbes 5%. Keevkihtpõletuse arendamise tähtis eelis on kütuse põletamisel tekkivate SO₂ ja NO_x heitkoguste vähenemine, samuti on tema kasutegur natuke kõrgem kui konkureerivatel meetoditel. Mullitava keevkihi (BFB) põletid pakuvad huvi seadmete puhul, mille katla nimivõimsus on suurem kui 10 MW_{th}. Tsirkuleeriva keevkihi (CFB) põletid sobivad rohkem jaamadele, mis on suuremad kui 30 MW_{th}. Minimaalseks jaama suuruseks, millest väiksema CFB ja BFB tehnoloogiad ei ole majanduslikult konkurentsivõimelised, loetakse umbes 5–10 MW_e [9].

1.5 Puidu põletamine ja tekkivad tahkete osakeste heitmed

Puidu põletamine on väga levinud elamute kütmiseks talvel kõikjal maailmas, eriti, kus puit on saadaval. San Jose Californiais võib talvekuudel olla 42% PM10-st tekkinud puidu põletamisest. Tahkete osakeste kogus, suurus ja samuti lenduvate orgaaniliste ühendite kogused ja liigid erinesid piirkonniti sõltuvalt, kas enam kasutati kütteks lehtpuid või okaspuid, kui viidi läbi modelleeriv uuring Fresno ja Bakerfieldis, California talveajal. Sarnaseid tulemusi on täheldatud ka Kanadas, kus on külmad talved ja külluslikult metsa, seal on puidu suits peamine peenosakeste heitkoguste allikas, kus majapidamises puidu põletamine tekitab rohkem kui 30% iga-aastastest tahkete osakeste heitkogustest

kaheksas ja enamasti provintsis ja üle 10% ülejäänud neljas provintsis. Uus-Meremaal Christchurchis on mõju lausa nii suur, et enam kui 90% talveajal õhus lenduv PM tuleb küttekollettide ja lahtisest tulest. Puu suits on probleem Launcestonis, Austraalias, kus pole külma talve, aga siiski esinevad külmemad kuud, kus tõuseb märgatavalt kodumaise puukütete kasutuse osakaal. Aastal 2000 umbes 45% Launcestoni majapidamistest kasutasid puukütteseadmeid ja 85% linnas täheldatud PM10-st seostati nende kasutamisega. Veel on teostatud uuringuid Norras ja Saksamaal, kus on samuti täheldatud elamutes puidupõletamise suurt mõju PM heitmetele ja LOÜ-de osas elamurajoonide juures [11].

Elamutes puidu põletamine on oluline atmosfäärisaaste allikas kogu maailmas ning selle tagajärgi ja mõju on uuritud sellistes riikides nagu Portugal, Itaalia, Taani, Soome ja Tšiili. Põhilised puidu põletamisel tekkivad emissioonid eralduvad puidu põlemisel tekkiva suitsuga, mis koosneb gaaside (CO , CO_2 , NO_x , SO_2) ja osakeste (PM10, PM2,5 ja PM1,0) segust. Tegelikult tekib erinevaid saasteaineid veel, näiteks sisalduvad emissioonid ka mitmeid toksilisi saasteaineid, sealhulgas orgaanilisi ühendeid, nagu benseen, formaldehüüd ja polütsükliilised aromaatsed süsivesinikud (PAH), mis kujutavad tõsist ohtu inimeste tervisele. Lisaks on mitmed teadlased, nagu näiteks Wang et al. [12] rõhutanud suurenenud terviseriske, mis on seotud siseruumides tekkivate ülipeenete osakeste heitkogustega (PM0,1–2,5), mis on natuke uuemate põletustehnoloogiate hindamisel tahaplaanile jäänud, võrreldes teiste näitajatega, aga on seejuures seotud suurte terviseriskidega kokku puutuvalle elanikkonnale. Kõik terviseriskid aga ei sõltu elamus kasutatavast põletustehnoloogiast. Teadlased nagu näiteks Du et al [13] täheldasid, et siseruumides biomassi põletamisel (nii keedu- kui ka küttepõletamisel) eraldunud PAH-ide toksilisus oli tihedalt seotud põletatud biomassi olemusega sõltuvalt konkreetestest kütteks kasutatud puuliikidest. Terviseriskidest suurim siiski on teadlaste nagu Poláčik jt [14] arvates see, et puidu põlemisel eralduvad peened osakesed võivad jõuda sisse hingates inimeste kopsudesse ja sealt kaudu vereringesse sattuda, mis kujutab endast olulist terviseriski, mis on seotud otseselt elamutes puidu põletamisega. Lisaks on täheldatud, et tahked osakesed toimivad ka patogeenide, nagu SARS-CoV-2 – COVID 19, transpordivektorina, suurendades õhusaaste edasikandumise mehhanismi inimestele (õhunakkus) õhustranspordi kaudu, mida soodustab õhusaaste [15]. Elamutes puidu põletamisel on riigiti üsna märkimisväärne mõju õhu kvaliteedile, näiteks Itaalias. Vastavalt Itaalia riiklikule heitkoguste inventuurile, mille koostab igal aastal Keskkonnakaitse- ja Teadusuuringute Instituut (ISPRA), tõi välja, et PM2,5 (osakesed aerodünaamilise läbimõõduga $<2,5 \mu\text{m}$), mis eralduvad erinevatest põlemisprotsessidest, sellest 21% moodustas tööstuslik põletamine ja 69% heitkogusest tekkisid mittetööstuslikus põletusvaldkonnas, millest 99% pärineb elamutes puidu põletamisest, mis on üks peamisi PM2,5 heiteallikaid Itaalias. Liu et al [16] teatasid, et elamutes puidu

põletamine põhjustas Hiinas 2010. aastal üle poole musta süsiniku heitkogustest ja enam kui kaks kolmandikku orgaanilise süsiniku heitkogusest. Mõlemad saasteained on seotud elanikkonna suurenenud terviseriskidega. Tšiilis deklareeris saasteainete heite- ja ülekanderegister (PRTR) 2016. aastal 164 738 tonni PM_{2,5} aastas, mille peamiseks allikaks on elamutes puidu põletamine (90% kogu PM_{2,5}-st) [15].

1.6 Puidu põletamisel tekkivad gaasilised emissioonid

Biomassi, sealhulgas puidu põletamisel tekib lenduvaid tahkeid osakesi, nii tööstulikul põletamisel kui ka koduses põletamisel ja tänu puhastuseadmete olemasolule tööstuses, tekib rohkem PM heitmeid isegi kodusest puidu põletamisest. Maailma Terviseorganisatsioon (WHO) väitis, et 2012. aastal oli õhusaaste iga kaheksanda surma (umbes 7 miljonit inimest) põhujeks kogu maailmas. Arvatakse, et enamik neist õhusaastega seotud surmajuhtumitest on seotud tahkete osakeste (PM) kokkupuutega. WHO võtab kokku viimase 20 kuni 30 aasta järelused, väites, et PM on seotud suurenenud haigestumise, üldsuremuse ja suremusega, mis on seotud südame-veresoonkonna ja hingamisteede haiguste, diabeedi ja kopsuvähiga. Need leiud tahkete osakeste tervisemõjude kohta näitavad, et puudub tahkete osakeste künnis, millest allpool ei täheldata tervisekahjustusi. Praegused WHO juhised ümbritseva õhu tahkete osakeste tasemete kohta eristavad PM-i ainult suuruse alusel, kuigi on põhjust arvata, et keemiline koostis mängib olulist rolli. Seega on üha rohkem tõendeid selle kohta, et põlemisel saadud süsinikku sisaldavad tahked osakesed, st must süsinik (BC) ja orgaaniline süsinik (OC) on tugevamini seotud tervisemõjudega kui muud osakeste massi fraktsioonid. Puidu põletamisel eralduvad gaasilised saasteained, nagu süsinikmonooksiid (CO), lämmastikoksiidid (NO_x), lenduvad orgaanilised ühendid (LOÜ) ja mitmed tahkete osakeste orgaanilised ühendid. Paljud neist orgaanilistest ühenditest omavad teadaolevalt tervisele kahjulikke mõjusid, nt benso[a]püreen (BaP), muud polütsükliilised aromaatsed süsivesinikud (PAH), benseen, formaldehüüd, 1,3-butadieen, fenoolid ja kresoolid [7].

Biomassi põletamine tähendab nii elava või surnud taimestiku, sealhulgas rohumaad, metsa, põllumajandusjäätmete looduslikku põlemist ja biomassi põletamist kütusena. Põlemine võib olla looduslik või inimese põhjustatud. Inimtekkelised tulekahjud hõlmavad taimestiku põletamist maa puhastamiseks ja maakasutuse muutmiseks ning küttepuidu põletamist, looduslike tulekahjude hulka kuuluvad äikesepõlengud. Savannide põlengud on suurimaks biomassi põlemise allikaks kogu maailmas, moodustades umbes 43% ülemaailmsetest heitkogustest, samas kui põllumajandusjäätmete põletamine ja metsatulekahjud annavad vastavalt 23% ja 18% koguheitest. Biomassi põletamisel eraldub palju erinevaid gaase, nagu CO, CO₂, CH₄, lenduvaid ja poollenduvaid orgaanilisi ühendeid, aldehüüde, orgaanilisi happeid ja anorgaanilisi elemente ning tahkeid osakesi (PM) [17].

Nüüd kirjeldan ja täpsustan puidu põletamisel tekkivaid emissioone ja nende kahjulikkust. Esimesena peab rääkima CO₂ heitmest, mis on kõige tuntum ja enimlevinud kasvuhoonegaas maailmas. Tema teket puidu ja muu biomassi põletamisel saab lugeda neutraalseks, kui arvestada, et biomassi looduslikul lagunemisel tekib ka CO₂ emissioon, aga viimasel ajal on tõusnud ka päevakorda tõsiasi, et põletamisel vabastatakse CO₂ kiiremini kui looduslik süsinikuringlus siduda jõuab ja seetõttu aitab biomassi põletus ikkagi kaasa CO₂ koguse suurenemisele ja kliima soojenemisele. Kasvuhoonegaas on mistahes gaasiline ühend, mis on võimeline neelama ja kiirgama infrapunakiirgust, võimaldades seeläbi väiksemal soojus hulgal kosmosesse tagasi peegelduda ja võimaldada madalamates atmosfäärikihtides suuremal soojushulgal neeldumist. Peamised kasvuhoonegaasid Maa atmosfääris on veeaur(H₂O), süsinikdioksiid (CO₂), metaan (CH₄), diämmastikoksiid (N₂O) ja osoon (O₃) [18].

Süsinikoksiid ehk CO on gaas, mis tekib kütuste, nagu propaan, maagaas, bensiin, nafta, kivisüsi või puit, mittetäielikul põlemisel. See on värvitu, lõhnatu ja maitsetu gaas, mistõttu ei saa seda ilma spetsiaalse seadmeta tuvastada. Süsinikmonooksiidiga kokkupuude võib põhjustada tõsiseid terviseprobleeme. Maailma mastaabis ei ole süsinikmonooksiidil olulist keskkonnamõju. Kuid emissioonikoha lähedal võib süsinikoksiid reageerida teiste õhusaasteainetega. Selle reaktsiooni ilmnemisel võib tekkida kahjulik maapinna lähedal asuv osoon. Süsinikmonooksiidi üks olulisemaid mõjusid on selle mõju elusorganismidele, lisaks loomadele ka inimesele. Kuna süsinikmonooksiid vähendab organismi võimet transportida hapnikku, on sellega kokkupuude kahjulik. Sõltuvalt kokkupuute tasemest võib süsinikmonooksiidi mõju tervisele erineda. Väikese kokkupuute korral võib süsinikmonooksiid põhjustada peavalu, väsimust, õhupuudust või mootorsete funktsioonide häireid. Kõrgel tasemel või pika kokkupuuteaja korral võib süsinikmonooksiid põhjustada pearinglust, valu rinnus, nägemise hägustumist ja mõtlemisraskusi. Lõpuks võib süsinikmonooksiidi väga kõrgel tasemel kokkupuude põhjustada krampe, koomat või isegi surma. Viimasel ajal on tehtud katseid vähendada atmosfääri paisatava süsinikmonooksiidi kogust, parandades tööstuslike ahjude tööd ja soodustades selle vähendamist piirangute kaudu, samuti on arendus toimunud koduste ahjude konstruktsioonis. Need meetmed on viimastel aastatel kaasa toonud süsinikmonooksiidi heitkoguste vähenemise [19].

Lämmastikoksiid (NO_x) on hapniku ja lämmastiku keemiline ühend, mis moodustub nende omavahelisel reageerimisel põlemisel kõrgel temperatuuril, peamiselt kütuste nagu õli, diiselmootor, gaas ja biomass põlemisel. NO_x on lämmastikoksiidide NO ja NO₂ üldnimetus. NO_x võib põhjustada tõsist kahju inimeste tervisele, sealhulgas hingamisteede haigusi. NO_x põhjustab ka sudu ja *brown cloud*-i, mis katab suuremaid linnu ja tagab halva õhukvaliteedi. NO_x heitkogused soodustavad happevihmade tekkimist ja maapinna

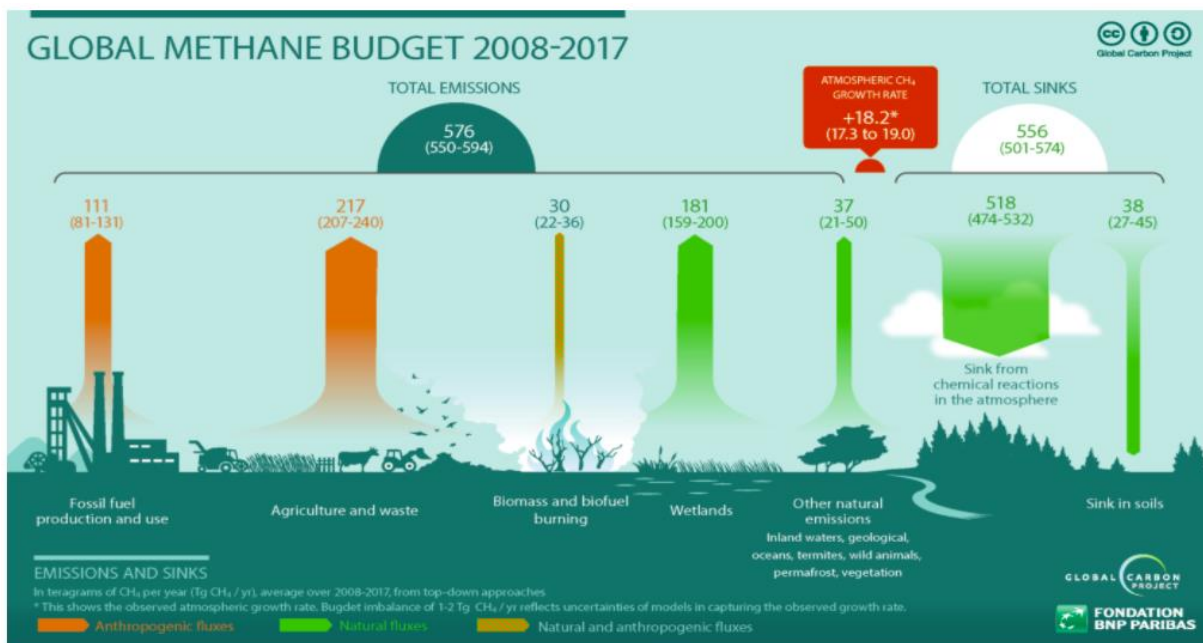
lähedase osooni moodustumist, mis võib kahjustada ökosüsteeme, loomi ja taimi. NO_x reageerib ammoniumi, veeauru ja muude ühenditega, moodustades lämmastikhapet (HNO₃), mis on vajalik happelihmade tekkeks. NO_x reageerib päikesevalguse toimel lenduvate orgaaniliste ühenditega ja moodustab maapinna osooni. Osooni võib tuul kanda pikemate vahemaade taha. NO_x võib kergesti reageerida ka tavaliste orgaaniliste ühenditega ja isegi osooniga, moodustades mitmeid mürgiseid komponente. NO_x heitkogused pärinevad Norras peamiselt energiatootmisest, maanteeliiklusest ja laevandusest. Riigisisene laevandus ja kalapüük moodustavad ligikaudu kolmandiku koguheitest. NO_x võib levida pikematele vahemaadele, kui see jõuab ühe päevaga troposfääri, seega ei ole NO_x ainult kohalik vaid hoopis piirkondlik probleem. NO_x heitmed võivad soodsates olukordades jõuda lausa teistele madritele läbides u. 5-10 päevaga vahemaa mitu tuhat kilomeetrit ja hakata loodust mõjutama hoopis seal. Norras on NO_x emissiooni allikateks peamiselt fossiilkütuste põletamine nafta- ja gaasitööstuses, tööstuses ning mobiilsetes allikates maal ja merel, aga tulevikus näha juurde tulevat NO_x heitme kogust just biomassi põletamisest [20].

Vääveldioksiid (SO₂), värvitu, halva lõhnaga mürgine gaas, mis kuulub suuremasse kemikaalide rühma, mida nimetatakse vääveloksiidideks (SO_x). Need gaasid, eriti SO₂, eralduvad fossiilkütuste – kivisöe, nafta ja diislikütuse – või muude väävlit sisaldavate materjalide põletamisel. Biomassis on enamasti väävlit vähem kui fossiilkütustes, aga see on siiski olemas. Nagu teada, kui SO₂ eraldub kütuste põletamisel, siis tema põhiallikad on elektri jaamad, metallide töötlemise tööstused ning sulatusrajatised ja sõidukid. Vääveldioksiid on ka vulkaanilise tegevuse loomulik kõrvalsaadus. Nagu lämmastikdioksiid, võib ka vääveldioksiid õhku sattudes tekitada sekundaarseid saasteaineid. Vääveldioksiidiga moodustunud sekundaarsete saasteainete hulka kuuluvad sulfaataerosoolid, tahked osakesed ja happelihmad. Vääveldioksiid, sellega seotud SO_x ja sekundaarsed saasteained võivad soodustada inimestel hingamisteede haigusi, muutes hingamise raskemaks, eriti laste, eakate ja olemasolevate haigustega inimeste puhul. Pikem kokkupuude võib süvendada ka olemasolevaid südame- ja kopsuhaigusi. Vääveldioksiid ja muud SO_x-d on osaliselt süüdi paksu udu ja sudu tekkes, mis võivad lisaks tervisele halvendada ka nähtavust. Lisaks inimeste tervisele avaldatavale mõjule võib vääveldioksiidi panus happelihmadesse põhjustada puudele ja taimedele otsest kahju, kahjustades nende avatud kudesid ja pidurdades seejärel taimede kasvu. Happelihmad mõjutavad ka teisi tundlikke ökosüsteeme ja veeteid [21].

Põllumajandussektor vastutab enam kui 90% NH₃ heitkoguste eest kogu Euroopas, aga siiski eraldub NH₃ emissioone ka biomassi põletamisel. NH₃ aitab kaasa hapete ladestumisele pinnases ja eutrofeerumisele, mis toob kaasa võimalikke muutusi pinnases ja vee kvaliteedis. Hapete sadestumisele järgnev mõju on märkimisväärne, hõlmates

kahjuliku mõju jõgede ja järvede veeökosüsteemidele kui ka kahju metsadele, põllukultuuridele ja muule taimestikule. Eutrofeerumine põhjustab tihti veekvaliteedi tõsiselt halvenemist, mis väljendub bioloogilise mitmekesisuse vähenemisega, muutustes liigilises koosseisus ja domineerimises ning toksilises mõjus elusorganismidele. Küll aga tuleb arvestada, et need kahjulikud mõjud ilmuvad alles siis, kui olukord ületab hapestavate ja eutrofeeruvate ainete ladestumise ökosüsteemide kriitilisi koormusi. NH₃ aitab kaasa ka tahkete osakeste aerosoolide tekkele atmosfääris. Tahked osakesed omavad kahjuliku mõju inimeste tervisele ja on olulised õhusaasteained, seetõttu on NH₃ kaudselt seotud ka inimeste tervisele avalduva mõjuga [22].

Ka metaani (CH₄) emissioonid on maailmas kasvavas trendis, nagu näha Joonis 1.3, tekib suur osa kogu emissiooni kogusest looduses iseneselikult, aga arvestatav osa tuleb ka põllumajandusest, jäätmemajandusest ja fossiilsete kütuste põletamisest. Kõige väiksem emiteerija praegu on biomassi ja biokütuse põletamine, aga rohepöörde kontekstis tema osakaal kasvab pidevalt fossiilsete kütuste vähem põletamise arvelt [23].



Joonis 1.3 Metaani eraldumise ja sidumise maailmas keskmine väärtus aastate vahemikus 2008-2017 [23]

2019. aastal moodustas metaan umbes 10 protsenti kõigist USA inimtegevusest tingitud kasvuhoonegaaside heitkogustest. Metaani paiskav inimtegevus hõlmab eelkõige lekkeid maagaasisüsteemidest ja kariloomade kasvatamist. Metaani eraldavad ka looduslikud allikad, näiteks looduslikud märgalad. Lisaks aitavad looduslikud protsessid pinnases ja keemilised reaktsioonid atmosfääris eemaldada CH₄ atmosfäärist. Metaani eluiga atmosfääris on palju lühem kui süsinikdioksiidil (CO₂), kuid CH₄ on soojuskiirguse püüdmissel tõhusam kui CO₂. Kui võtta 0,5 kg CH₄ ja 0,5 kg CO₂ siis CH₄ võrdlev mõju

umbes 25 korda suurem kui CO₂ mõju 100 aasta jooksul. Ülemaailmselt tuleb 50–65 protsenti CH₄ koguheitest inimtegevusest [24].

Kogu orgaaniline süsinik lühendina (TOC) on viis proovides orgaanika sisalduse mõõtmiseks. Kuna vajadus jätkusuutlikkuse järele ja teadlikkus keskkonnaprobleemidest kasvab, pööravad organisatsioonid rohkem tähelepanu oma süsiniku jalajäljele. Üks võimalus seda teha on regulaarne TOC mõõtmine oma tarbevees ja õhu emissioonides ja võimalusel TOC koguse vähendamine nendes nii, et see ei kahjustaks keskkonda ega vee tarbijaid või kasutajaid. TOC on kõigi proovis olevate orgaaniliste molekulide ülitundlik mittespetsiifiline mõõtmine. Siis on võimalik seda kasutada kemikaalide keskkonda sattumise reguleerimiseks. Vees leiduvad orgaanilised ühendid ühinevad keskkonda sattudes teiste elementidega, moodustades molekule, mis võivad olla toodetele ja keskkonnale kahjulikud. Samas kui õhuemissioonides leiduvad süsinikku sisaldavad ühendid nagu CO₂, CO, CH₄ ja teised lenduvad orgaanilised ühendid põhjustavad kliimasoojenemist [25].

Mõiste LOÜ (lenduv orgaaniline ühend) viitab paljudele süsinikku sisaldavatele keemilistele ühenditele. Toatemperatuuril kipuvad lenduvad orgaanilised ühendid olema vedelad või tahked, kõrge aururõhuga, mis tähendab, et need aurustuvad kergesti gaasilistesse olekutesse. Viimastel aastatel on järjest enam tähelepanu pööratud lenduvatele orgaanilistele ühenditele kui saasteainetele ja terviseohtudele. Lenduvad orgaanilised ühendid esinevad atmosfääris looduslikult ja tekivad protsesside käigus nagu taimestiku kasv ja pinnase aktiivsus. Samuti tekib LOÜ-sid looduslikul ja inimtegevuse raames biomassi põletamisel. Oluline osa LOÜ kogunemisest atmosfääri pärineb aga tehisallikatest. Nende hulka kuuluvad maanteeliiklus, keemiatööstuse protsessid nt toornafta krakkimine ja sellega kaasnevad heitmete emissioonid. Märkimisväärsed on veel keemiatööstuse tooted, mis eraldavad kõrges kontsentratsioonis lenduvaid orgaanilisi ühendeid (nt värvid, lahustid ja lakid). Lenduvate orgaaniliste ühendite heitkoguste mõju inimeste tervisele on olenevalt nende variatsioonist erinev. Mõned lenduvad orgaanilised ühendid on kahjutud, kuid paljud on madalal tasemel mürgised, teised aga süttivad kõrgemal kontsentratsioonil. Korduv ja pikaajaline vähesel määral kokkupuude kahjulike lenduvate orgaaniliste ühenditega võib põhjustada tõsiseid terviseprobleeme. Näiteks formaldehüüd, stüreen, benseen ja teised aromaatsed ühendid on tuntud kantserogeenid. Kasvav teadlikkus lenduvate orgaaniliste ühendite kroonilisest mürgisusest on toonud kaasa töökeskkonna piirnormide vähendamise ja suurenenud nõuded otsese mõõtmise kohta. Lisaks kahjulikele tervisemõjudele põhjustab lenduvate orgaaniliste ühendite eraldumine atmosfääri tõsiseid keskkonnaprobleeme. Üks neist on maapinna lähedal osooni moodustumine, mis põhjustab sudu. Lisaks maapinna lähedase osooni moodustumisele võivad mõned LOÜ-d oma suure lõhna intensiivsuse tõttu põhjustada lõhnaprobleeme. Protsessid, nagu jäätmete

põletamine, toiduainete töötlemine ja reoveepuhastus, eraldavad palju halvalõhnalisi LOÜ gaase ja sageli põhjustavad lähedal asuvatele elanikele lõhnahäiringuid [26].

1.7 Puidu põlemise etapid ja nendega kaasnevad emissioonid

Põlemisperioodide varieerimine kogu põlemisperioodi jooksul on eri uuringutes teatatud heitkoguste määramatuse oluline aspekt. Saasteainete teke süttimisest põlemiseni on nüüdseks saanud rohkem huvi ja seda on uuritud paljude reaalaja mõõteseadmetega. Elamute põlemisheitmete uuringutes uuriti õhu saasteaineid, nagu lenduvad orgaanilised ühendid ja erinevatest faasidest pärinevate peenosakeste emissioonide muutusi. Uurimine aitab mõista nende teket ja mehhanisme. Uuringutes täheldati, et CO ja TOC (orgaanilise süsiniku kogusumma) heitkogused olid stardifaasides oluliselt suuremad ning 30–40% tahkete osakeste heitkogustest tekkis süütamisperioodil. Põletamise staadium tekitas suurema osa NO_x-st (80–90%), samal ajal kui süütamis- ja kustumisfaasis eraldus vaid 10–20%, mis näitab selget erinevust emissioonides erinevate faaside lõikes [27].

Süütefaasis toimub kütuse niiskuse ja madala aururõhuga lenduvate ainete lendumine. Alguses on põlemistemperatuur madal, kütuse põlemiskiirus aeglane ja lenduvad ained ei põle täielikult. Põlemata lenduvad ained põhjustavad kõrge LOÜ ja osakeste heitkoguseid. Heal juhul kestab süütefaas paar minutit, aga võib kesta mitu korda kauem ja selle tulemusena kestab faas, milles on kütuse ja õhu ebapiisav segunemine ning kõrged heitkogused kauem. LOÜ heitkogused käivitusfaasis on samuti suuremad kui teistes faasides ning karbonüüli emissioon on 2–3 korda suurem kui püsiva põlemise faasis. Lisaks on ka tahkete osakeste massi heitkogused suured [28].

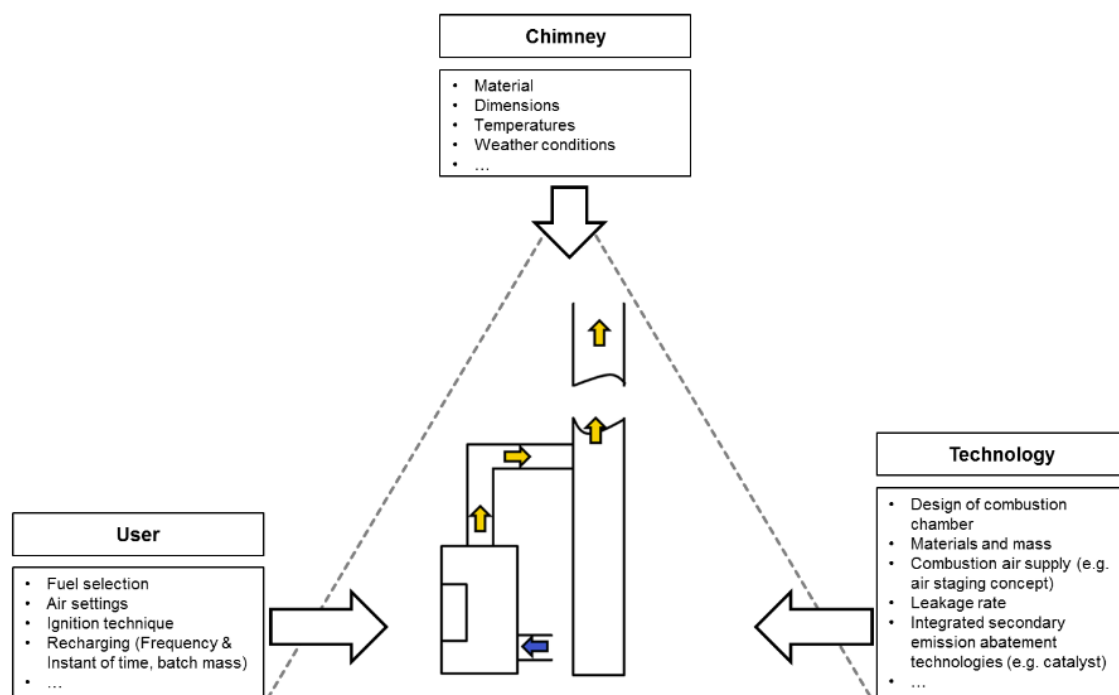
Põlemistemperatuurid leegifaasis on tavaliselt kõrged ja soodustavad seega täielikku põlemist. Sageli on täheldatud, et alates süttimisest kuni põlemisfaasini PM_{2,5}, CO ja lenduvate orgaaniliste ühendite heitkogused vähenevad, samas kui CO₂ emissioon suureneb. Enamik lenduvaid aineid põleb peaaegu täielikult ära. Märkimisväärseid erinevusi emissioonides leitakse ka orgaaniliste ainete, näiteks PAH-de puhul; näiteks, et kõigi erinevate testitud põletite puhul olid PAH-de ja orgaanilise aerosooli heitmed leegifaasis madalamad kui süütefaasis [29].

Hõõgumisfaasi määratlus on kirjanduses mõnevõrra vastuoluline. Mõnes uuringus klassifitseeriti faasid, mille MCE oli < 0,90, hõõgumisfaasiks, kuid teistes uuringutes oli peamine erinevus põlemis- ja hõõgumisfaasi vahel see, kas faasis on nähtavad tule leegid. Põlemistemperatuur hõõgumisfaasis on madalam kui leegifaasis ning madalama hapniku difusioonikiiruse tõttu on gaaside, sealhulgas CO ja lenduvate orgaaniliste ühendite emissioon suitsufaasis kõrgem kui leegifaasis. Faasierinevused sõltuvad saasteainete tüüpidest, küttehju tüüpidest ja mõõtmistehnoloogiast. On leitud, et lenduvate

orgaaniliste ühendite heitkogused hõõgumisfaasis ($5402,9 \pm 2031,8$ mg/kg) on hapnikupuuduse tõttu ligikaudu ühe suurusjärgu võrra suurem kui põlemisfaasis ($559,2 \pm 385,9$ mg/kg) [30]. Siiski leiab ka teaduskirjandust, kus tulemused näitavad, et lenduvad heitkogused vähenevad ja süsinikuliikide eraldumise kiirus oli hõõgumisfaasis peaaegu stabiilne. Need tulemused näitavad, et saasteainete moodustumise ja heitkoguste dünaamilised muutused on keerulised ja sõltuvad kütteahju ehituse erinevustest ning võivad saasteainete tüüpide puhul erineda [27].

1.8 Nõuded ahjudele

Ahjud on paljudes külmema kliimaga riikide elamutes tähtsaks kütteseadmeks, mis kasutab biomassi, eelkõige halupuid. Seega on nad ka arvestatavad õhuemissioonide tekitajad. Emissioonid sõltuvad suuresti ahju tüübist ja konstruktsioonist, kasutatavast kütusest, küttemetoodikast ja muudest teguritest nagu kujutatud Joonis 1.4, seetõttu on IEA otsustanud uurida ahjude efektiivsust ja emissioonide koguseid ja keskkonnahoidmis eesmärgil seada ahjudele teatavad piirangud ja nõudmised, et soodustada kaasaegsete paremate tehnoloogiate levikut.



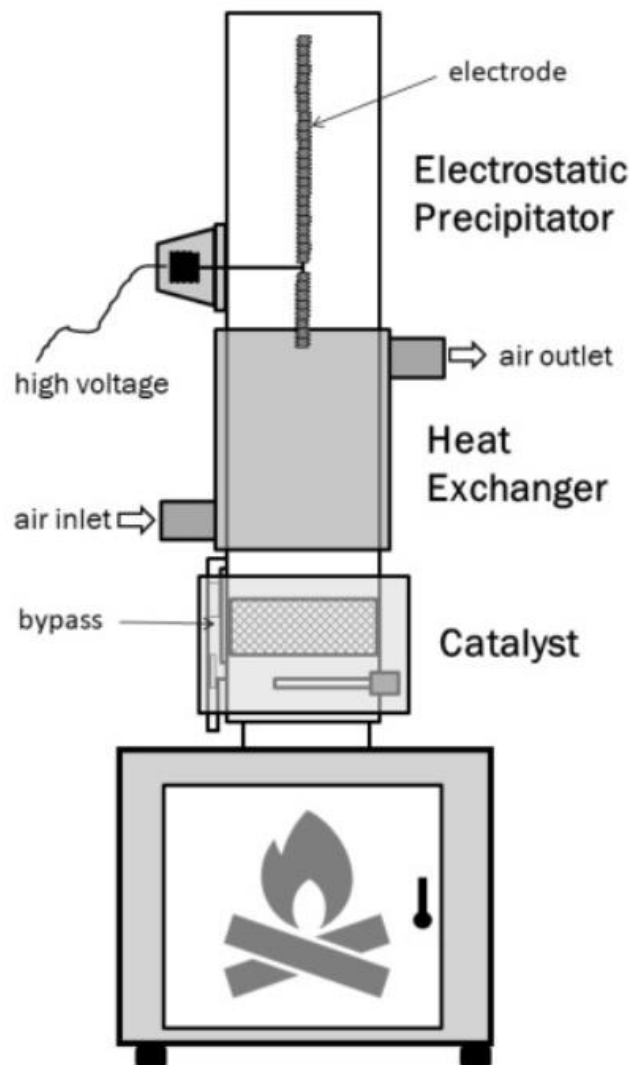
Joonis 1.4 Kütteahju küttesüsteemi komponendid, mis mõjutavad efektiivsust ja emissioone [31]

Biomassi kasutavad ahjud ja kaminad on enimkasutatav taastuvenergia tehnoloogia, mis on pakkumisel elamutes. Need kõik on reguleeritud Euroopa standardite järgi ja liigitatud erinevate tehnoloogiate järgi (nt küttepuukütteseadmed – EN13240, sise- ja lahtised kaminad – EN13229, biomasspliidid – EN12815, aeglase kuumutuseseadmed – EN15250). Need standardid sisaldavad spetsiifilisi katsemenetlusi, mille eesmärk on tagada

minimaalne emissioonide heide ja tõhusus ning lõppkasutaja ohutus. Iga tootetüüpi tuleb enne turule toomist testida. Küttepuid kasutavate küttekehade puhul, mis moodustavad suurema osa kohapeal paigaldatavatest ruumikütteseadmetest ja ka aastas müüdavate toodete arvust, on ametlik tüübitesti (oTT) meetod määratletud standardis EN13240. Testimisprotseduur hindab ahju jõudlust emissioonide ja termilise efektiivsuse osas ainult täpselt määratletud tingimustes. See võimaldab testitulemuste kõrget usaldusväärsust, kuid viib katsetulemusteni, mis on tavakasutuses tavaliselt kättesaamatud. Kuna heitkoguste piirväärtused (ELV) on aga korrelatsioonis oTT-meetodiga, keskendub tehnoloogia areng klientide vajaduste asemel parimate oTT-tulemuste saavutamisele. Paljudes uuringutes hinnati kriitiliselt õhusaaste olukorda korrelatsioonis ahju jõudlusega. Selle tulemusena karmistati viimastel aastatel paljudes Euroopa riikides oTT tulemuste piirväärtusi. 2022. aastal jõustuvad uue ökodisaini ja ökomärgise direktiivi piirväärtused, mis seavad üldise etaloni heitmete ja tõhususe osas. Kuid ka need ELV-d keskenduvad EN standardite testimisprotseduurile. Selles IEA uuringus käsitleti teaduslikke uuringuid ja kasutati erinevaid katseprotokolle, mis peaksid paremini kajastama reaalselt ahjude tööd, näiteks erinevate ahjutehnoloogiate emissioonitegurite uurimine lõpptarbija tingimustes. Käesolevas töös on välja toodud need katseprotseduurid ning emissiooni- ja efektiivsustulemusi võrreldakse oTT tulemuste, välikatsete tulemuste ja pakutud emissiooniteguritega. Välikatsete tulemuste võrdlus näitas kütteahjude tehnoloogilise paranemise tendentsi viimasel aastakümnel. Kuid võrreldes oTT tulemustega on paranemine oluliselt väiksem. Seeriatootmisahjude kordustestid vastavalt standardile EN 13240 näitasid palju suuremaid heitkoguseid ja madalamaid efektiivsustulemusi võrreldes vastavate ahjumudelite oTT tulemustega. BeReali testikontseptsioon näitas laboris testitulemuste head vastavust välikatsete tulemustele. Siiski on katsestendi tulemused võrreldes välikatsete tulemustega endiselt ülehinnanud kasutegurit. Täiustatud ahjude välikatsete tulemuste võrdlemisel kavandatud emissiooniteguritega olid CO ja tahkete osakeste emissioonide enam vähem vastavuses. LOÜ emissioonide puhul näib aga, et EEA (Euroopa Keskkonnaagentuuri) emissioonitegur on kaks korda väiksem reaalsete olukordade testide tulemustest. Kokkuvõtteks võib öelda, et standardit tuleks pidada vahendiks, mis tõukab tehnoloogilist arengut edasi optimeeritud tegeliku töö suunas. Lisaks võimaldaks see lõpptarbija jaoks paremini eristada häid ja kehvemaid tooteid, pidades silmas tavalist tegelikku kasutust. Reaalsele elule orienteeritud katseprotokoll (nagu inbeReal) kasutamine heitetegurite määramiseks näib olevat võimalik, kuid vajab täiendavat uurimist. Standardiseeritud laboris mõõdetud heitkoguste andmekogusid tuleks korrapäraselt ajakohasemaks muuta eluliste välimõõtmistega, kuid siis tuleb seada katsekontseptsiooni kohaselt reaalsemad heitetegurite piirnormid [31].

Kuna keskkonnasõbralikku ja minimaalsete emissioonide kogustega ahjukütet on raske saavutada ainult ahju konstruktsiooni uuenduslike lahenduste ja kütismeetoodikaga, on

uuritud ka ahjudele lisaseadmete paigaldust emissioonide vähendamiseks ja kasuteguri suurendamiseks. Katseahi on varustatud modulaarse heitgaaside puhastussüsteemiga, mis ühendab endas kolm tehnoloogiat: katalüütiline oksüdatsioon, soojustagastus ja elektrostaatiliste osakeste sadestamine. Joonis 1.5 on näidatud sellise ahju põhikonfiguratsioon.



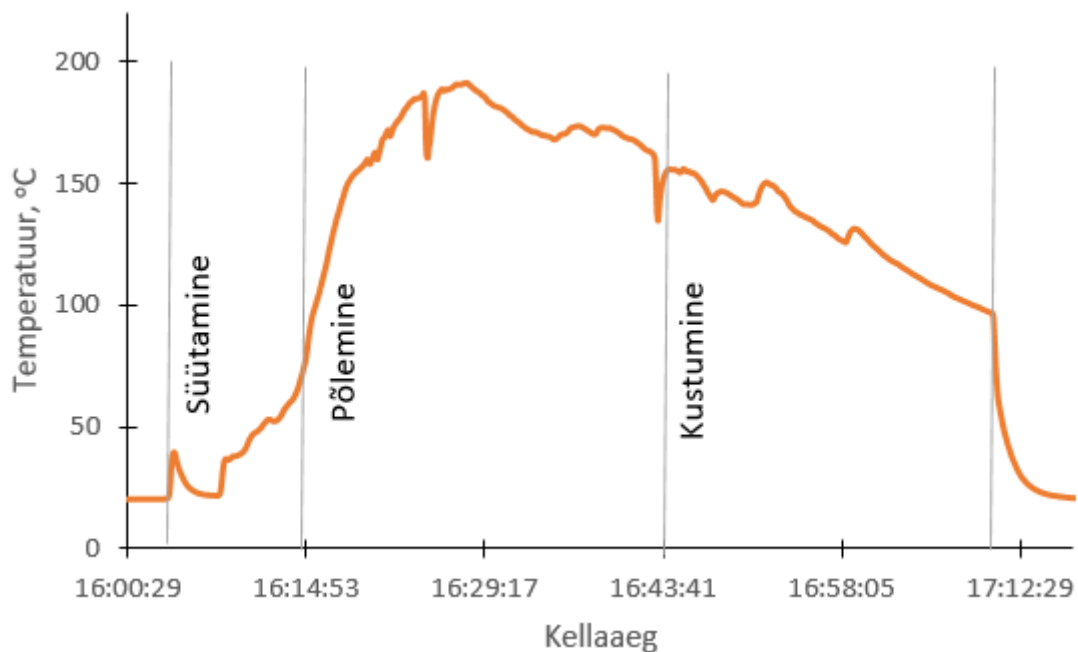
Joonis 1.5 Modulaarse suitsugaaside puhastuseadmega ahju kontseptsiooni skeem [32]

Katalüütiline seade paigutati põlemata heitgaasikomponentide oksüdeerimiseks ahju väljalaskeavale võimalikult lähedale. Selle eeliseks on see, et heitgaas on katalüsaatoris muundamiseks võimalikult kuum. Suitsugaasi komponentide (CO ja LOÜ) oksüdeerumise tõttu katalüsaatoris vabaneb energia soojuse kujul. Vabaneva lisasoojuse ära kasutamiseks ja efektiivsuse tõstmiseks saaks soojuse osaliselt ruumi üle kanda soojusvaheti abil. Soojusvahetist allavoolu ühendati elektrostaatiline filter, et eraldada suitsugaasis sisalduvad tahked osakesed. Elektrifiltri paigutus pärast soojusvahetit võimaldab

madalamaid heitgaaside temperatuure filtri läbimisel. See toob kaasa elektrifiltri suurema tööstabiilsuse, kuna liiga kõrged temperatuurid võivad põhjustada elektrostaatilise välja purunemise välksädeme või lekkevoolu tõttu. Läbiviidud katsed näitasid, et ahju konkreetsete parameetrite parandamiseks saab paigaldada erinevaid üksikuid moderniseerimisseadmeid. Elektrifilter vähendas PM osakeste heitmeid, katalüsaator vähendas CO ja LOÜ heitkoguseid ja soojusvaheti suurendas tõhusust. Kombineerides näitasid elektrifilter ja katalüsaator positiivset koosmõju, vähendades tahkete osakeste heitkoguseid veelgi. Sünergia seisneb elektrifiltri paremas jõudluses, kuna heitgaasis on tänu katalüütilisele sedamele vähem tahma sisaldavaid osakesi [32].

2 METOODIKA JA KATSEANDMETE KOGUMINE

Uurimistöö eesmärk on uurida tekkivaid emissioone koduse ahju kütmisel ja kui suurel määral seda mõjutab küttemetoodika ja puitkütuse valik. Selleks teostati Tulikivi TU 1000/50 ahjus mitmeid põletuskatseid, mis iseloomustasid tavapärasest ahjukütmist kodus. Katsetes kasutati reaajas suitsugaaside koostise mõõtmiseks FT-IR spektromeetrit ja põlemisgaaside temperatuuri mõõtmiseks termopaariga ühendatud Picolog andmekogujat. Picolog-is tekkiva temperatuuri muutuse graafiku alusel jagati katse kolmeks perioodiks, mida saab omavahel võrrelda: süütamis-, põlemis- ja söestumis-/kustumisfaas. Süütamisfaas algas ahju all tule süütamisega ja lõppes, kui temperatuuri kasv suitsugaasides muutus ühtlasemaks/linearsemaks Joonis 2.1. Siis hakkas põlemisfaas, mis kestis kuni puude algse asetuse kokkuvarisemisest tekitatud viimase temperatuuri tõusuni. Seejärel kestis kustumisfaas kogu suitsugaaside temperatuuri languse aja, kuni ahju kustumiseni ehk söed lõpetasid hõõgumise. Kõikide perioodide kestel kogus FT-IR andmeid suitsugaaside koostise kohta. Mõõdeti järgmiste komponentide sisaldust põlemisgaasides: NO, NO₂, SO₂, CO, CH₄, NH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₂H₄, C₆H₆, O₂, CO₂, H₂O, TOC ja LOÜ. Samal ajal kui FT-IR mõõtis suitsugaaside komponentide koostist, teostati ka suitsugaaside käigus rõhu mõõtmised, et oleks hilsemates arvutustes võimalik arvutada konkreetsete gaaside koguseid voos ja ajaühikus.



Joonis 2.1 Põlemise etappide määramine põlemisgaaside temperatuurigraafiku alusel

Katseid teostati kokku 33 tükki ja nendeks kasutati kahte puiduliiki, milleks oli lepp ja kuusk. Kõik leppahalud olid ostetud ühelt müüjalt ja korraga samast partiist ja samoodi oli ostetud ka kuuse halud. Kütuste elementaaranalüüsi tulemused on toodud Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Puiduliikide elementaaranalüüs

Puuliik	N (%)	C (%)	H (%)	S (%)
Kuusk	0,05	50,20	6,00	<m.p.
Lepp	0,31	49,13	5,97	<m.p.

Elementaaranalüüs näitas, et lepa lämmastiku sisaldus oli kõrgem kui kuusel, süsiniku osa oli aga madalam kui kuusel ja vesiniku sisaldus oli väga väikese erinevusega (jäi mõõtemääramatuse sisse), aga siiski ka väiksem kui kuusel. Väavli sisaldus oli mõlemas puuliigis alla määramispiiri.

Igale katsele, mis on loetletud Tabel 2.2 teostati kolm paralleelkatset, et vältida katse tulemuste juhuslikust ja et saaks võrrelda katsete keskmiseid ja arvutada ka mõõtemääramatust. Katsete teostamiseks asetati puud ahju koldesse risti ja jäeti 25-35% vaba ruumi, et tagada koldes õhu liikumine ja sellest lähtuvalt vältida ebasobivaid põlemistingimusi. Süütamiseks kasutati tikke ja gaasisüütajat, enamasti oli süütevahendiks paber, süütekatsete korral ka süütabletid ja ajaleht. Enne igat katset kaaluti ka ahju minev kütuse kogus, mis varieerus vahemikus 4,29-6,60 kg, kuna ahju asetati sama kogus halge visuaalse eristatavusega: kaks väikest, kuus keskmist ja kaks suurt halgu. Katsete käigus muudeti erinevaid parameetreid, et määrata nende mõju suitsugaaside koostisele. Võrreldi kuuse ja lepa põlemisel tekkivaid suitsugaase, nii külma ahju kütmisel tekkivat suitsugaasi koostist, kui ka eelnevalt köetud kuuma ahju kütmisel tekkivat suitsugaasi koostist. Samuti võrreldi süütamiskatset, kui süütamiseks kasutada paberit, ajalehti või süütabletti. Lisaks uuriti ka kütuse alt ja ülevalt süütamise mõju emissioonidele. Samuti mõõdeti külma ahju ja seejärel kuuma ahju kütmise koondtulemusi külma ahju kütmise ja selle kustumise faasi alguses puude lisamisega. Viimasena võrreldi emissioone sõltuvalt põlemisõhu reguleerimisest. Selleks varieeriti õhuava ja tuha resti avatust.

Tabel 2.2 Katsete loetelu ja kirjeldus

Katse number	Katse kirjeldus
1, 3, 5 ja keskmine	külm ahi, ristiasetus, süütamine ülevalt, õhk ainult alt täiesti avatud, lehtpuu lepp, tikud, paber, mass 5,06 kg, 5,46 kg, 5,47 kg, 5,33 kg
2, 4, 6 ja keskmine	kuum ahi, ristiasetus, süütamine ülevalt, õhk ainult alt täiesti avatud, lehtpuu lepp, tikud, paber, mass 6,60 kg, 5,56 kg, 5,60 kg, 5,92 kg
7, 8, 9 ja keskmine	süüte katse, ristiasetus, süütamine ülevalt, õhk ainult alt täiesti avatud, lehtpuu lepp, tikud, tablett, alg mass 5,03 kg ja puudelisamine 2 halgu=1 kg, 5,54 kg ja puudelisamine 2 halgu=0,75kg, 5,44 kg ja puudelisamine 2 halgu=1,36 kg, 5,34 kg ja puudelisamine 2 halgu=1,04 kg
10, 11, 12 ja keskmine	süüte katse, ristiasetus, süütamine ülevalt, õhk ainult alt täiesti avatud, lehtpuu lepp, tikud, ajaleht, alg mass 5,23 kg ja puudelisamine 4 halgu=3 kg, 5,34 kg ja puudelisamine 4 halgu=2,77 kg, 5,26 kg ja puudelisamine 4 halgu=2,16 kg, 5,28 kg ja puudelisamine 4 halgu=2,64 kg
13, 14, 15 ja keskmine	süüte katse, ristiasetus, süütamine alt, õhk ainult alt täiesti avatud, lehtpuu lepp, tikud, paber, alg mass 4,98 kg ja puudelisamine 3 halgu=1,97 kg, 5,92 kg ja puudelisamine 3 halgu=2,15 kg, 4,29 kg ja puudelisamine 3 halgu=1,75 kg, 5,06 kg ja puudelisamine 3 halgu=1,96 kg
16, 18, 20 ja keskmine	külm ahi, ristiasetus, süütamine ülevalt, õhk alt täiesti avatud, aga tõmbe rest kinni, lehtpuu lepp, tikud, paber, mass 4,87 kg, 6,20 kg, 4,84 kg, 5,30 kg
17, 19, 21 ja keskmine	kuum ahi, ristiasetus, süütamine ülevalt, õhk alt täiesti avatud, aga tõmbe rest kinni, lehtpuu lepp, tikud, paber, mass 5,46 kg, 5,98 kg, 4,80 kg, 5,41 kg
22, 24, 26 ja keskmine	külm ahi, ristiasetus, süütamine ülevalt, õhk alt pool lahti ja tõmbe rest täiesti lahti, lehtpuu lepp, tikud, paber, mass 5,55 kg, 5,51 kg, 5,16 kg, 5,41 kg
23, 25, 27 ja keskmine	kuum ahi, ristiasetus, süütamine ülevalt, õhk alt pool lahti ja tõmbe rest täiesti lahti, lehtpuu lepp, tikud, paber, mass 6,40 kg, 5,81 kg, 6,03 kg, 6,08 kg
28, 30, 32 ja keskmine	külm ahi, ristiasetus, süütamine ülevalt, õhk ainult alt täiesti lahti, okaspuu kuusk, tikud, paber, mass 5,49 kg, 5,32 kg, 6,32 kg, 5,71 kg
29, 31, 33 ja keskmine	kuum ahi, ristiasetus, süütamine ülevalt, õhk ainult alt täiesti lahti, okaspuu kuusk, tikud, paber, mass 6,35 kg, 6,50 kg, 5,90 kg, 6,25 kg

2.1 Kasutatud katseahi

Tulikivi on ettevõtte, mis toodab ahjusid ja pliite, mis vastavad Euroopa Liidu standarditele ja tahavad olla eesrindlikud oma kaasaegsete tehnoloogiliste lahendustega, kõrge kasuteguri ja madalate heitmekogustega. Tulikivi on pakkunud oma tooteid Eestis juba 20 aastat ja selle ajaga müünud üle 6000 kütteseadme ja sellega arvestatavalt Eesti ahjude tehnoloogiat uuendanud. Ka antud teadustöös tehtud mõõtmist teostati Tulikivi ahjuga TU 1000/50 (Joonis 2.2). TU 1000/50 on Tulikivi andmetel järgmiste omadustega: maailma rangeimatele saastennormidele vastav vähene tolmu- ja süsinikmonoksiidi heide, energiaklass A+, kasutegur 88%, maksimaalne puude kogus 8,1 kg, energiahulk 31 kWh, köetav pind 30-70 m². Soojuse loovutusaeg, protsentides maksimaalsest võimsusest, on

järgmine: 1,9 h (100%), 10,7 h (50%), 18,1 h (25%). Ahju TU 1000/50 ruumilised andmed on: laius 840 mm, sügavus 480 mm, kõrgus 1230 mm, mass 945 kg, tulepesa laius 310 mm, tulepesa sügavus 245 mm [33].



Joonis 2.2 Tulikivi ahi, mida kasutati katsete läbi viimiseks

2.2 FT-IR suitsugaaside koostise määramiseks

Fourier' teisendusega infrapunaspetskroopia ehk lühendina FT-IR on meetod, mida kasutatakse gaasi emissiooni infrapunaspetsktri saamiseks. FT-IR-spektromeeter kogub samaaegselt kõrge eraldusvõimega spektriandmeid laias spektrivahemikus. Antud töös kasutati spektromeetrit Gasmeter DX4000. Hapniku sisalduse mõõtmiseks kasutatakse seadmes integreeritud tsirkooniumoksiid hapnikuandurit, kuna kaheaatomilistel gaasidel pole IR piirkonnas neeldumisjooni. Suitsugaasides gaasiliste komponentide mõõtmisel ja määramisel FT-IR-iga juhenduti eelkõige kahest normdokumendist. Töö FT-IR-iga põhineb standardil EVS-EN 15259:2007 – *Air quality – Measurement of stationary source emissions*, kus on kirjas soovitus ja nõudmised õhuemissioonide mõõtmiste läbi viimiseks erinevates katseolukordades. Teine juhend on Calcmeter™ 2005 User`s Guide and Reference Manual-2005–04-15, mis katab juhtprogrammi Calcmeter osa.

Iga päev enne mõõtmiste alustamist mõõdeti taustaspetskter (ehk nn *background*) puhta lämmastikuga. Järgmisena toon välja Joonis 2.3 ja Joonis 2.4, mis näitavad analüsaatori paiknemist ja mõõtepea ühendust ahju suitsugaaside käiku, mis paikneb enne korstent.



Joonis 2.3 FT-IR analüsaator laptopi all ja Pico andmekoguja laptopi taga



Joonis 2.4 FT-IR-i mõõtepea, koos termopaariga ahju suitsugaaside käigus

Katsete vahel puhuti FT-IR-i komponendid läbi õhuga, et kontrollida mõõtetäpsust ja eelmise katse gaasid täielikult süsteemist väljutada.

2.3 Temperatuuri mõõtmine

Samaaegselt FT-IR-iga suitsugaaside mõõtmisega, teostati paralleelselt termopaari ja termopaaride andmelugeriga suitsugaaside temperatuuri mõõtmine, et hinnata ja jagada katse kolmeks faasiks temperatuurigraafiku alusel. Temperatuuri mõõtmiseks kasutatud seadmed olid TC-08 termopaaride andmeluger (S/N: A0044/824, tootja Pico Technology) ja K-tüüpi termopaar (tootja Omega Engineering). Temperatuuri mõõtmine toimus FT-IR-iga samadel tingimustel, siseruumides ja termopaar mõõtis samas mõõtekohas FT-IR-i mõõtepeaga, seetõttu on Pico ja termopaar nähtavad Joonis 2.3 ja Joonis 2.4. Temperatuuri mõõtmisel lähtuti standarditest EVS-NE 60584-1:2013 ja EVS-NE 60584-3:2008. Suitsugaasi temperatuuri mõõtmiseks sisestati anduri (K-tüüpi termopaar) ots läbi

mõõteava gaasikäiku. Antud katsetel kasutati pidevat mõõtmist, et graafikul toimuvad muutused oleksid täpselt nähtavad.

2.4 Arvutused mõõtetulemustest lõpp-tulemuste saamiseks

Andmetöötlus hõlmas järgmisi tegevusi:

- Kuna algandmed on märgades gaasides (mahuühikutes), siis komponentide kontsentratsioonid teisendatakse kuivadele gaasidele:

$$C_i(\text{kuiv}) = \frac{\text{aine kontsentratsioon} \cdot 100\%}{(100\% - H_2O \text{ maht}\%)} \quad (2.1)$$

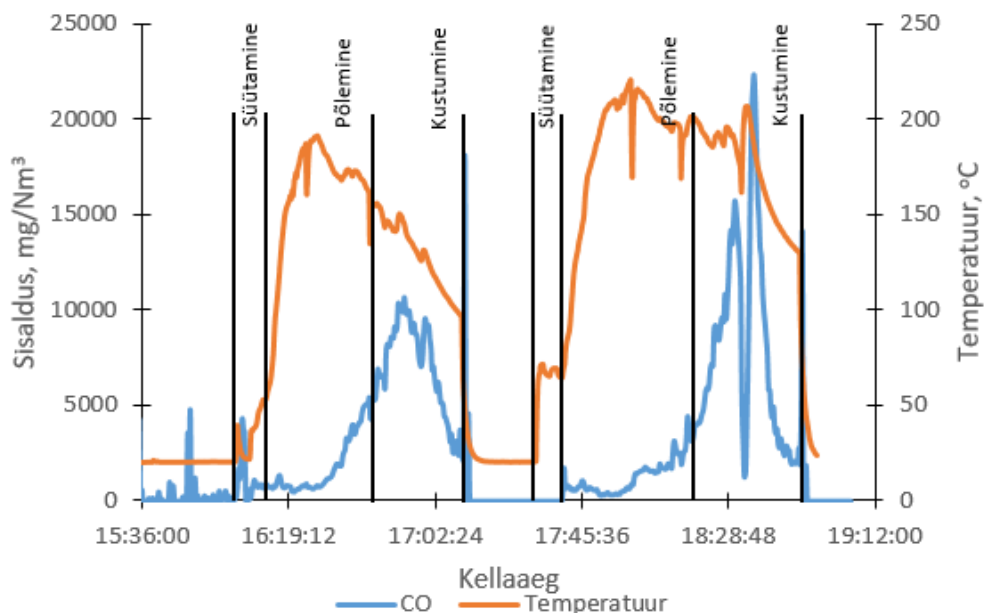
- Kuivade gaaside mõõdetud väärtused teisendatakse hapniku sialdusele 13%:

$$C_i(O_2 \text{ 13\%}) = \text{aine kontsentratsioon} * \frac{(20,9 - 13)}{(20,9 - O_2\%)} \quad (2.2)$$

- Mõõtetulemused teisendatakse võrreldavateks suurusteks (mg/Nm³, 13% O₂):

$$C_i \left(\frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \right) = \frac{\text{aine kontsentratsioon} * M_{\text{aine}}}{V_m} \quad (2.3)$$

- Seejärel koostatakse graafik, kus on kujutatud emissiooni väärtused vastavalt temperatuurile mõõdetud ajal. Graafiku järgi pannakse paika punktid, millega põlemine jagatakse kolmeks faasiks (Joonis 2.5).



Joonis 2.5 Katsete 1 ja 2 põlemisgaasi temperatuuri ja CO sisalduse muutus ajas

- Seejärel leitakse põlemisperioodide keskmised emissiooni väärtused ühikus mg/Nm³

- Arvutatakse emissioonidele masskulud ühikus mg/s, selle jaoks on vaja ka rõhu mõõtmise andmeid suitsugaaside käigust, et arvutada gaaside kiirust:

$$\dot{m} = v * \pi * \frac{d^2}{4} * C_i, \quad (2.4)$$

kus \dot{m} on masskulu, v on põlemisgaaside kiirus m/s, d on põlemisgaaside käigu läbimõõt m

- Arvutatakse konkreetse emissiooni komponendi kogumass erinevate perioodide jooksul:

$$m = \frac{\dot{m} * t}{1000}, \quad (2.5)$$

kus m on komponendi emissiooni kogumass g perioodis, t on perioodi kestus s

- Arvutatakse summaarne katses tekkinud konkreetse emissiooniaine eriemissioon mg/kg_{kütus}:

$$m_{eri} = \frac{\dot{m}_{süütamine} + \dot{m}_{põlemine} + \dot{m}_{kustumine}}{m_{kütus}} \quad (2.6)$$

2.4.1 Mõõtemääramatuse arvutamine

Mõõtemääramatus klassifitseeritakse kaheks tüübiks: A- ja B-tüüpi määramatus. A-tüüpi määramatuse hindamine toimub eksperimendi käigus tehtud kordusmõõtmiste statistiline analüüsi teel. A-tüüpi määramatus on antud töös eksperimentaalsete korduskatsete tulemuste standardhälve jagatud ruutjuurega korduste arvust:

$$u_a = \frac{\text{standardhälve}}{\sqrt{n}} \quad (2.7)$$

B-tüüpi määramatust hinnatakse kogemuslikult, teoreetiliselt või muul viisil, lähtudes eeldatavast tõenäosusjaotusest. Antud töös määrati B-tüüpi määramatust kolmel seadmel. Esiteks FT-IR seadme u_b määramatus oli kõigil mõõdetud emissiooniainetel erinev, vahemikus 6,45%-18,79%. See sõltus katses mõõdetud aine keskmisest kontseratsiooni erinevusest kalibreeritud mõõteväärtusega. Suitsugaaside käigus kasutatud rõhu mõõtmise seadme u_b oli 5%, mille sai mõõtevahendi kalibreerimistunnistuselt. Kaalu, millega kaaluti kütuseid, u_b oli 0,2%, mille sai passist. Antud töös on kõik määramatused antud standard liitmääramatuse kujul, korduvalt tehtud otseste mõõtmiste korral avaldub liit(standard)määramatus järgnevalt:

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (2.8)$$

3 AHJU KÜTMISE KATSETE TULEMUSTE KIRJELDUS JA VÕRDLUS

Töö põhiosas võrdlen erinevate katsete ja nende keskmiseid väärtuseid seitsme mõõdetud emissiooninaine põhjal. Eesmärgiks oli selgitada, kui palju tekib emissioone ahju kütisel tavaolukorras ja kui palju saab ahju kütisel tehtavate valikutega mõjutada lõplike emissioonide väärtuseid.

3.1 Lepaga külma ja kuuma ahju kütmise võrdlus

Tabel 3.1 on kujutatud NO_x emissioonid lepaga külma ahju ja kuuma ahju kütisel. Tabelist on näha, et NO_x emissioonivood olid suuremad külma ahju süütamise faasis, aga põlemis- ja kustumisfaasis oli suurem NO_x voog kuuma ahju kütmise katsetes. Seda on näha ka katsete keskmiseid tulemusi võrreldes. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine NO_x masskulu on 2,06 mg/s suurem katsete 2, 4, 6 keskmisest. Põlemis- ja kustumisfaasi keskmised masskulud on 1,65 mg/s ja 2,87 mg/s võrra madalamad 2, 4, 6 keskmistest. Emiteeritud NO_x kogumassi korral on näha sama trendi nagu emissioonivoogude ajaühikus võrdlemisel. Külma ahju kütisel on süütamisfaasis suurem ja põlemis- ja kustumisfaasis väiksem NO_x emissioon võrreldes kuuma ahju kütisega. Märkimisväärne on erinevus katsete põlemisfaasi keskmises NO_x emissiooni massis. Katsete 1, 3, 5 korral on keskmine emiteeritud NO_x mass 7,73 g väiksem katsete 2, 4, 6 keskmisest. Ühe massiühiku kütuse põlemisel emiteeritud NO_x massi võrdlemisel on näha, et kütuse massi kohta oli NO_x emissioon suurem kuuma ahju kütisel. Kui võrrelda külma ja kuuma ahju katsete keskmiseid emiteeritud NO_x koguseid kütuse kg kohta, siis on näha, et kuuma ahju kütisel oli NO_x emissioon keskmiselt 0,69 g/kg suurem.

Tabel 3.1 NO_x heitmed lepaga külma ja kuuma ahju kütisel

Katse	Külma ahju kütmine lepaga				Kuuma ahju kütmine lepaga			
	1	3	5	Keskmine	2	4	6	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	12,8	9,91	5,04	9,25±2,41	2,72	10,79	8,06	7,19±2,45
Põlemisfaas	6,03	6,69	6,97	6,56±0,62	8,32	7,91	8,41	8,21±0,71
Kustumisfaas	6,17	3,96	3,02	4,38±1,01	9,6	8,25	3,9	7,25±1,84
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	7,68	5,35	3,93	-	1,8	3,24	6,77	-
Põlemisfaas	14,8 4	16,0 6	19,24	16,71±1,9 2	24,9 5	25,17	23,21	24,44±2,14
Kustumisfaas	7,03	7,85	5,43	-	10,9 5	7,92	5,15	-
Summaarne emissioon, g	29,5 6	29,2 6	28,6	29,14	37,7	36,33	35,13	36,39

Tabel 3.1 Jätkub

	Külma ahju kütmine lepage				Kuuma ahju kütmine lepage			
Katse	1	3	5	Keskmine	2	4	6	Keskmine
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	6,6	5,56	5,6	5,92
Eriemissioon g/kg	5,84	5,36	5,23	5,48±0,49	5,71	6,53	6,27	6,17±0,57

Tabel 3.2 on kujutatud SO₂ emissioonid lepage külma ahju ja kuuma ahju kütmisel. Tabelist on näha samuti, et SO₂ emissioonivood olid suuremad külma ahju süütamisfaasis, aga põlemis- ja kustumisfaasis oli suurem SO₂ voog kuuma ahju kütmise katsetes. Katsete 1, 3, 5 keskmine süütamisfaasi masskulu on 0,27 mg/s suurem katsete 2, 4, 6 keskmisest. Põlemis- ja kustumisfaasi keskmised masskulud katsetel 1, 3, 5 on vastavalt 0,03 mg/s ja 0,43 mg/s võrra väiksemad katsete 2, 4, 6 keskmistest. Emitteeritud SO₂ kogumassi korral on näha sama trendi nagu emissioonivoogude ajaühikus võrdlemisel. Külma ahju kütmisel on süütamisfaasis suurem ning põlemis- ja kustumisfaasis väiksem SO₂ emissioon võrreldes kuuma ahju kütmisega. Katsete põlemisfaaside keskmiste tulemuste erinevus SO₂ emissiooni massis on väike. Katsete 1, 3, 5 korral on emiteeritud SO₂ mass 0,16 g madalam katsete 2, 4, 6 keskmisest. Ühe massiühiku kütuse põlemisel emiteeritud SO₂ massi võrdlemisel on näha, et kütuse massi kohta oli SO₂ emissioon kõrgem kuuma ahju kütmisel, aga see vahe on väike. Kui võrrelda külma ja kuuma ahju katsete keskmiseid emiteeritud SO₂ koguseid kütuse kg kohta, on näha, et kuuma ahju kütmisel oli SO₂ emissioon keskmiselt 0,02 g/kg suurem, aga jääb määramatuse piiresse ja statistiliselt on tulemused võrdsed.

Tabel 3.2 SO₂ heitmed lepage külma ja kuuma ahju kütmisel

	Külma ahju kütmine lepage				Kuuma ahju kütmine lepage			
Katse	1	3	5	Keskmine	2	4	6	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	1,09	0,92	0,26	0,76±0,28	0,22	0,32	0,93	0,49±0,23
Põlemisfaas	0,2	0,11	0,3	0,20±0,06	0,28	0,21	0,2	0,23±0,04
Kustumisfaas	1,37	0,18	0,36	0,64±0,38	2,25	0,58	0,39	1,07±0,61
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	0,66	0,49	0,2	-	0,15	0,1	0,78	-
Põlemisfaas	0,49	0,26	0,83	0,53±0,18	0,85	0,66	0,55	0,69±0,13
Kustumisfaas	1,56	0,36	0,66	-	2,57	0,55	0,51	-
Summaarne emissioon, g	2,7	1,12	1,68	1,84	3,56	1,31	1,84	2,24
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	6,6	5,56	5,6	5,92
Eriemissioon, g/kg	0,53	0,21	0,31	0,35±0,11	0,54	0,24	0,33	0,37±0,10

Tabel 3.3 on kujutatud CO emissioonid lepaga külma ahju ja kuuma ahju kütmisel. Tabelist on näha samuti, et CO emissiooni vood olid suuremad külma ahju süütamise faasis, aga põlemis- ja kustumisfaasis oli kõrgem CO voog kuuma ahju kütmise katsetes. Seda on näha ka katsete keskmiseid tulemusi võrreldes. Katsete 1, 3, 5 keskmine süütamisfaasi masskulu on 9,56 mg/s suurem kui 2, 4, 6, katsete keskmine. Põlemis- ja kustumisfaasi keskmised masskulud on katsetel 1, 3, 5 on vastavalt 31,49 mg/s ja 55,0 mg/s võrra madalamad. Emiteeritud CO kogumassi korral on näha, et külma ahju kütmisel on süütamis- ja kustumisfaasis suurem ja põlemisfaasis väiksem emissioon võrreldes kuuma ahju kütmisega. Märkimisväärne on põlemisfaasi keskmiste emiteeritud CO masside erinevus. Katsete 1, 3, 5 keskmine CO mass on 144,41 g madalam katsete 2, 4, 6 keskmisest. CO emissioon katsetel sisseantud kütuse koguse kohta oli kõrgem kuuma ahju kütmisel. Kui võrrelda külma ja kuuma ahju katsete keskmiseid CO koguseid kütuse kg kohta, siis katsetel 1, 3, 5 on see keskmiselt 11,46 g/kg madalam, mis on märkimisväärne vahe ja võib viidata, sellele, et kuuma ahju kütmisel lähevad temperatuurid kõrgemaks ja see võib soodustada suuremat tõmmet korstnasse ja nii jõuab vähem CO osakesi täielikult põleda.

Tabel 3.3 CO heitmed lepaga külma ja kuuma ahju kütmisel

Katse	Külma ahju kütmine lepaga				Kuuma ahju kütmine lepaga			
	1	3	5	Keskmine	2	4	6	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	27,03	22,04	18,52	22,53±3,07	8,73	16,59	13,59	12,97±2,53
Põlemisfaas	124,49	83,03	116,19	107,90±15,43	171,13	152,95	94,08	139,39±25,89
Kustumisfaas	147,66	147,37	151,16	148,73±12,19	253,46	126,41	231,33	203,73±42,55
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	16,22	11,9	14,45	-	5,76	4,98	11,41	-
Põlemisfaas	306,23	199,28	320,69	275,40±44,39	513,38	486,39	259,66	419,81±87,45
Kustumisfaas	168,33	291,8	272,1	-	288,95	121,36	305,36	-
Summaarne emissioon, g	490,79	502,98	607,23	533,67	808,09	612,72	576,43	665,75
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	6,6	5,56	5,6	5,92
Eriemissioon, g/kg	96,99	92,12	111,01	100,04±9,93	122,44	110,2	102,93	111,86±10,76

Tabel 3.4 on kujutatud NH₃ emissioonid lepaga külma ahju ja kuuma ahju kütmisel. Tabelist on näha, et NH₃ emissioonivood olid suuremad kuuma ahju kütmisel kõigis faasides. Seda on ka näha ka katsete keskmiseid tulemusi võrreldes, kõige väiksema emissioonivoo erinevusega oli põlemisfaas. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine

masskulu on 0,06 mg/s ehk täpselt kolm korda väiksem katsete 2, 4, 6 keskmisest tulemusest. Siiski see vahe ei ole eriti oluline, kuna mõõdetud väärtused on väiksed ja mõõtemääramatus suur. Põlemis- ja kustumisfaasi keskmised masskulud katsetel 1, 3, 5 on vastavalt 0,03 mg/s ja 0,13 mg/s võrra väiksemad katsete 2, 4, 6 keskmistest tulemustest. NH₃ kogumassi võrdlemisel on näha, et külma ahju kütmisel on süütamis- ja põlemisfaasis väiksem, aga kustumisfaasis suurem NH₃ emissioon kui kuuma ahju kütmisel. Põlemisfaasis emiteeritud NH₃ masside erinevus on arvestatav. Katsete 1, 3, 5 keskmine NH₃ mass on 0,14 g väiksem katsete 2, 4, 6 keskmisest. Kütuse kg kohta emiteeritud NH₃ koguste võrdlemisel näeb, et kuuma ahju kütmisel oli see keskmiselt 0,01 g/kg suurem, kuid see vahe on üsna tühine arvestades, kui väike see kogus on ja et see jääb mõõtemääramatuse sisse.

Tabel 3.4 NH₃ heitmed lepaga külma ja kuuma ahju kütmisel

Katse	Külma ahju kütmine lepaga				Kuuma ahju kütmine lepaga			
	1	3	5	Keskmine	2	4	6	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	0	0,1	0	0,03±0,02	0	0,27	0	0,09±0,06
Põlemisfaas	0,1	0,12	0,2	0,14±0,04	0,14	0,2	0,17	0,17±0,04
Kustumisfaas	0,24	0,39	0,18	0,27±0,08	0,32	0,68	0,2	0,40±0,16
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	0	0,05	0	-	0	0,08	0	-
Põlemisfaas	0,25	0,3	0,57	0,37±0,12	0,42	0,64	0,48	0,51±0,12
Kustumisfaas	0,27	0,76	0,32	-	0,36	0,65	0,26	-
Summaarne emissioon, g	0,52	1,11	0,89	0,84	0,78	1,37	0,74	0,96
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	6,6	5,56	5,6	5,92
Eriemissioon, g/kg	0,1	0,2	0,16	0,16±0,04	0,12	0,25	0,13	0,17±0,05

Tabel 3.5 on kujutatud CH₄ emissioonid lepaga külma ahju ja kuuma ahju kütmisel. Tabelist on näha, et CH₄ emissioonivood olid suuremad külma ahju kütmisel kõigis faasides. Seda on eelkõige näha katsete keskmiseid tulemusi võrreldes, sest põlemisfaasis oli emissioonide voog peaaegu sama nii külma kui ka kuuma ahju kütmisel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine masskulu on 0,56 mg/s ehk üle poole võrra suurem katsete 2, 4, 6 keskmisest. Põlemis- ja kustumisfaasi keskmised masskulud katsetel 1, 3, 5 on vastavalt 0,01 mg/s ja 0,07 mg/s võrra suuremad katsete 2, 4, 6 keskmistest. Emiteeritud CH₄ kogumasside võrdlemisel on näha, et külma ahju kütmisel on see süütamis- ja kustumisfaasis suurem, aga põlemisfaasis väiksem kui kuuma ahju kütmisel. Põlemisfaasis emiteeritud CH₄ masside väärtused on arvestatava erinevusega. Katsete 1, 3, 5 keskmine CH₄ mass on 0,60 g väiksem katsete 2, 4, 6 keskmisest. Ühe kg kütuse kohta emiteeritud CH₄ koguseid võrreldes on näha, et see oli külma ahju kütmisel kõrgem. Siiski saadi ka

kõige väiksem katsetulemus külma ahju kütmisel. Külma ja kuuma ahju kütmise keskmiste CH₄ koguste kütuse kg kohta võrdlemisel on näha, et kuuma ahju kütmisel oli see 0,13 g/kg madalam, kui külma ahju kütmisel ning see vahe tundub märkimisväärne, kuid jääb ka määramatuse sisse.

Tabel 3.5 CH₄ heitmed lepaga külma ja kuuma ahju kütmisel

Katse	Külma ahju kütmine lepaga				Kuuma ahju kütmine lepaga			
	1	3	5	Keskmine	2	4	6	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	1,12	1,33	0,81	1,09±0,18	0,23	0,5	0,87	0,53±0,19
Põlemisfaas	0,99	1,66	2,07	1,57±0,35	1,84	1,22	1,63	1,56±0,23
Kustumisfaas	0,43	1,1	0,29	0,61±0,26	0,61	0,72	0,28	0,54±0,14
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	0,67	0,72	0,63	-	0,15	0,15	0,73	-
Põlemisfaas	2,43	3,99	5,71	4,04±1,02	5,52	3,88	4,51	4,64±0,64
Kustumisfaas	0,49	2,17	0,53	-	0,7	0,69	0,37	-
Summaarne emissioon, g	3,59	6,88	6,86	5,78	6,38	4,72	5,61	5,57
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	6,6	5,56	5,6	5,92
Eriemissioon, g/kg	0,71	1,26	1,25	1,07±0,21	0,97	0,85	1	0,94±0,10

Tabel 3.6 on kujutatud kogu orgaanilise süsiniku (TOC) emissioonid lepaga külma ahju ja kuuma ahju kütmisel. Tabelist on näha, et TOC emissioonivood olid suuremad külma ahju kütmisel süttimis- ja põlemisfaasides, kuigi taaskord põlemisfaasis on vahe külma ja kuuma ahju kütmisel minimaalne. Kustumisfaasis oli aga kuuma ahju katsete TOC emissioonivoog suurem. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine TOC masskulu on 0,92 mg/s võrra suurem katsete 2, 4, 6 keskmisest. Põlemis- ning kustumisfaasi keskmine masskulu on vastavalt 0,03 mg/s võrra suurem külma ahju kütmisel ning 0,16 mg/s võrra suurem kuuma ahju kütmisel. Emitteeritud TOC kogumassi võrdlemisel on näha, et külma ahju kütmisel saadi suuremad väärtused süütamis- ja kustumisfaasis ning väiksemad põlemisfaasis kui kuuma ahju kütmisel. Katsete põlemisfaaside keskmiste tulemuste erinevus TOC emissiooni massis on arvestatav. Katsete 1, 3, 5 keskmine emitteeritud TOC mass on 1,04 g madalam katsete 2, 4, 6 keskmisest. Ühe kg kütuse põlemisel vabanenud TOC koguste võrdlemisel on näha, et antud emissioon oli suurem külma ahju kütmisel. Ühtlasi saadi ka kõige väiksem katsetulemus külma ahju kütmisel. Kui võrrelda keskmiseid TOC koguseid, siis on näha, et kuuma ahju kütmisel oli see keskmiselt 0,29 g/kg võrra väiksem. See vahe on üsna märkimisväärne võrreldes varasemate emissioonide võrdlustega ja iseloomustab trendi, aga jääb siiski määramatuse piiresse.

Tabel 3.6 TOC heitmed lepaga külma ja kuuma ahju kütmisel

Katse	Külma ahju kütmine lepaga				Kuuma ahju kütmine lepaga			
	1	3	5	Keskmine	2	4	6	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	4,22	4,93	1,94	3,70±0,96	0,74	4,76	2,85	2,78±1,18
Põlemisfaas	1,75	3,08	3,73	2,86±0,63	3,22	2,21	3,06	2,83±0,40
Kustumisfaas	1,42	2,3	0,84	1,52±0,44	1,87	2,38	0,81	1,68±0,48
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	2,53	2,66	1,52	-	0,49	1,43	2,39	-
Põlemisfaas	4,31	7,4	10,3	7,34±1,84	9,66	7,04	8,44	8,38±1,05
Kustumisfaas	1,62	4,55	1,52	-	2,13	2,28	1,06	-
Summaarne emissioon, g	8,47	14,6 1	13,34	12,14	12,28	10,75	11,9	11,64
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	6,6	5,56	5,6	5,92
Eriemissioon, g/kg	1,67	2,68	2,44	2,26±0,36	1,86	1,93	2,12	1,97±0,19

Tabel 3.7 on kujutatud LOÜ emissioonid lepaga külma ahju ja kuuma ahju kütmisel. Tabelist on näha, et LOÜ emissioonivood olid suurimad just süütamisfaasis, kus külma ahju kütmisel olid emissioonid natuke suuremad kui kuuma ahju kütmisel. Põlemisfaasis olid LOÜ emissioonid tunduvalt väiksemad, aga trend oli sama – külma ahju kütmise LOÜ emissioonivoog oli minimaalselt suurem. Kustumisfaasis läksid emissioonivood kuuma ahju kütmisel suuremaks kui külma ahju kütmisel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine masskulu on 0,13 mg/s võrra suurem katsete 2, 4, 6 keskmisest. Põlemisfaasi keskmine masskulu on 0,02 mg/s võrra suurem külma ahju kütmisel ja kustumisfaasi keskmine on 0,27 mg/s võrra suurem kuuma ahju kütmisel. Kui võrrelda emiteeritud LOÜ kogumassi, siis on näha, et külma ahju kütmisel on see suurem süütamis- ja kustumisfaasis ning väiksem põlemisfaasis kui kuuma ahju kütmisel. Põlemisfaaside mõõtetulemustest saadud keskmiste väärtuste erinevus on arvestatav. Katsete 1, 3, 5 keskmine emiteeritud LOÜ kogus on 0,2 g väiksem katsete 2, 4, 6 keskmisest. Kütuse massiühiku kohta oli emiteeritud LOÜ kogus suurem külma ahju kütmisel. Ka keskmiseid väärtusi võrreldes on kuuma ahju kütmisel tekkinud LOÜ kogus 0,10 g/kg väiksem. Antud vahe võib lugeda märkimisväärseks, kuid see jääb ka määramatuse sisse.

Tabel 3.7 LOÜ heitmed lepaga külma ja kuuma ahju kütmisel

Katse	Külma ahju kütmine lepaga				Kuuma ahju kütmine lepaga			
	1	3	5	Keskmine	2	4	6	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	2,64	3,05	0,81	2,17±0,74	0,42	4,07	1,64	2,04±1,10
Põlemisfaas	0,37	0,76	0,84	0,66±0,17	0,64	0,51	0,77	0,64±0,11
Kustumisfaas	0,81	0,76	0,44	0,67±0,14	1,04	1,38	0,41	0,94±0,30
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	1,58	1,65	0,63	-	0,28	1,22	1,38	-
Põlemisfaas	0,92	1,82	2,32	1,69±0,46	1,93	1,61	2,13	1,89±0,27
Kustumisfaas	0,93	1,5	0,78	-	1,18	1,33	0,54	-
Summaarne emissioon, g	3,42	4,97	3,73	4,04	3,39	4,16	4,04	3,86
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	6,6	5,56	5,6	5,92
Eriemissioon, g/kg	0,68	0,91	0,68	0,76±0,12	0,51	0,75	0,72	0,66±0,11

3.2 Kuusega külma ja kuuma ahju kütmise võrdlus

Tabel 3.8 on kujutatud NO_x emissioonid kuusega külma ahju ja kuuma ahju kütmisel. Tabelist on näha, et NO_x emissioonivood olid väiksemad külma ahju süütamis- ja põlemisfaasis ning kustumisfaasis suuremad kui kuuma ahju kütmisel. Katsete 28, 30, 32 süütamisfaasi keskmine NO_x masskulu on 0,99 mg/s võrra väiksem katsete 29, 31, 33 keskmisest. Põlemisfaasis on kuuma ahju kütmisel NO_x masskulu keskmiselt 1,3 mg/s võrra suurem ja see on märkimisväärne vahe. Kustumisfaasis saadi keskmiselt 0,36 mg/s võrra suurem masskulu külma ahju kütmisel. Kui võrrelda emiteeritud NO_x kogumassi, siis selgub, et külma ahju kütmisel on see süütamisfaasis suurem ning põlemis- ja kustumisfaasis väiksem kui kuuma ahju kütmisel. Märkimisväärne on põlemisperioodi keskmine emiteeritud NO_x koguse vahe - külma ahju kütmisel 4,06 g väiksem kui kuuma ahju kütmisel. Kütuse massiühiku kohta oli NO_x kogus suurem kuuma ahju kütmisel. Kui võrrelda mõõtetulemustest saadud keskmiseid väärtusi, siis kuuma ahju kütmisel oli NO_x kogus kg kütuse kohta 0,34 g/kg suurem kui külma ahju kütmisel, aga see jääb siiski määramatuse sisse.

Tabel 3.8 NO_x heitmed kuusega külma ja kuuma ahju kütmisel

Katse	Külma ahju kütmine kuusega				Kuuma ahju kütmine kuusega			
	28	30	32	Keskmine	29	31	33	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	3,94	4,81	4,71	4,49±0,47	5,43	7,2	3,8	5,48±1,08
Põlemisfaas	2,45	3,17	3,06	2,89±0,33	4,38	4,25	3,93	4,19±0,38
Kustumisfaas	1,09	1,53	7,36	3,33±2,04	1,52	4,71	2,68	2,97±0,96
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	5,44	0,87	3,39	-	3,58	2,59	0,68	-
Põlemisfaas	7,2	9,7	9,93	8,94±1,15	14,45	13,01	11,5 5	13,00±1,38
Kustumisfaas	1,5	2,29	11,05	-	2,91	9,33	3,86	-
Summaarne emissioon, g	14,15	12,85	24,37	17,12	20,94	24,93	16,0 9	20,66
Kütuse mass, kg	5,49	5,32	6,32	5,71	6,35	6,5	5,9	6,25
Eriemissioon, g/kg	2,58	2,42	3,86	2,95±0,52	3,3	3,84	2,73	3,29±0,42

Tabel 3.9 on kujutatud SO₂ emissioonid kuusega külma ahju ja kuuma ahju kütmisel. Tabelist on näha, et SO₂ emissioonivood olid külma ahju kütmisel süütamis- ja põlemisfaasis väiksemad, aga kustumisfaasis suuremad kuuma ahju kütmisel. Katsete 28, 30, 32 süütamisfaasi keskmine SO₂ masskulu on 0,10 mg/s võrra väiksem katsete 29, 31, 33 keskmisest. Põlemisfaasis on kuuma ahju kütmise SO₂ masskulu keskmiselt 0,08 mg/s võrra suurem. Kustumisfaasis on aga külma ahju kütmisel 0,52 mg/s võrra suurem emissioonivoog. See on üsna märkimisväärne vahe, mille põhjuseks on ühe katse tunduvalt suurem emissioonivoog, mitte ühtlane trend. SO₂ kogumassi võrdlemisel on näha, et külma ahju kütmisel on süütamis- ja kustumisfaasis suurem ning põlemisfaasis väiksem emiteeritud SO₂ kogus kui kuuma ahju kütmisel. Põlemisperioodis tekkis külma ahju kütmisel keskmiselt 0,26 g võrra vähem SO₂-te kui kuuma ahju kütmisel. Ühe kg kütuse koguse kohta olid SO₂ heitmed suuremad külma ahju kütmisel. Kui võrrelda keskmiseid emiteeritud koguseid, siis kuuma ahju kütmisel saadi 0,11 g/kg väiksem tulemus. Antud vahe on põhjustatud ühe katse palju kõrgemast väärtusest.

Tabel 3.9 SO₂ heitmed kuusega külma ja kuuma ahju kütmisel

Katse	Külma ahju kütmine kuusega				Kuuma ahju kütmine kuusega			
	28	30	32	Keskmine	29	31	33	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	0,64	0,25	0,49	0,46±0,13	0,65	0,58	0,45	0,56±0,10
Põlemisfaas	0,12	0,14	0,12	0,13±0,02	0,25	0,16	0,23	0,21±0,04
Kustumisfaas	0,35	0	2,29	0,88±0,72	0,34	0	0,72	0,36±0,21
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	0,88	0,04	0,35	-	0,43	0,21	0,08	-
Põlemisfaas	0,35	0,42	0,4	0,39±0,06	0,82	0,48	0,68	0,66±0,14
Kustumisfaas	0,48	0	3,43	-	0,66	0	1,04	-
Summaarne emissioon, g	1,71	0,48	4,19	2,12	1,91	0,69	1,8	1,47
Kütuse mass, kg	5,49	5,32	6,32	5,71	6,35	6,5	5,9	6,25
Eriemissioon, g/kg	0,31	0,09	0,66	0,35±0,17	0,3	0,11	0,31	0,24±0,07

Tabel 3.10 on kujutatud CO emissioonid kuusega külma ahju ja kuuma ahju kütmisel. Tabelist on näha, et CO emissioonivood olid külma ahju kütmise katsetel süütamis- ja põlemisfaasis suuremad ning kustumisfaasis väiksemad kui kuuma ahju kütmise katsetel. Seda on näha ka katsete keskmiseid tulemusi võrreldes. Katsete 28, 30, 32 süütamisfaasi keskmine CO masskulu on 1,02 mg/s võrra suurem katsete 29, 31, 33 keskmisest. Põlemisfaasis on kuuma ahju kütmisel CO masskulu keskmiselt 21,99 mg/s võrra väiksem. Kustumisfaasis saadi külma ahju kütmisel keskmiselt 48,46 mg/s võrra väiksem tulemus. Mõlemad vahed on üsna märkimisväärsed. Kui võrrelda CO kogumassi, siis on näha, et külma ahju kütmisel emiteeriti süütamis- ja põlemisfaasis suurem ning kustumisfaasis väiksem CO kogus võrreldes kuuma ahju kütmisega. Põlemis- ja kustumisperioodi keskmised emissioonikogused on külma ahju kütmisel vastavalt 67,27 g suuremad ja 125,43 g väiksemad. Antud märkimisväärsed vahed on tekkinud katsegruppide trendidest. Kütuse massiühiku kohta on emiteeritud CO kogused sarnased. Kui võrrelda keskmiseid koguseid, siis kuuma ahju kütmisel tekkis antud emissiooni keskmiselt 0,52 g/kg rohkem, mis on üsna väike vahe ja määramatuse sees, nii et statistiliselt on tulemused võrdsed.

Tabel 3.10 CO heitmed kuusega külma ja kuuma ahju kütmisel

Katse	Külma ahju kütmine kuusega				Kuuma ahju kütmine kuusega			
	28	30	32	Keskmine	29	31	33	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	15,9 2	21,6 4	26,84	21,47±3,61	16,8	24,93	19,63	20,45±2,92
Põlemisfaas	84,5 8	100, 3	95,82	93,57±8,96	67,17	72,05	75,53	71,58±6,33
Kustumisfaas	118, 94	124, 84	123,6 9	122,49±10,1 6	208,2 6	138,4	166,2	170,95±24,6 4
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	21,9 7	3,89	19,33	-	11,09	8,98	3,53	-
Põlemisfaas	248, 65	306, 91	310,4 6	288,67±30,9 2	221,6 7	220,4 8	222,0 4	221,40±18,0 7
Kustumisfaas	164, 13	187, 26	185,5 3	178,98±16,4 0	399,8 6	274,0 3	239,3 3	304,41±54,7 6
Summaarne emissioon, g	434, 75	498, 06	515,3 1	482,71	632,6 2	503,4 8	464,9 1	533,67
Kütuse mass, kg	5,49	5,32	6,32	5,71	6,35	6,5	5,9	6,25
Eriemissioon, g/kg	79,1 9	93,6 2	81,54	84,78±8,21	99,63	77,46	78,8	85,3±9,99

Tabel 3.11 on kujutatud NH₃ emissioonid kuusega külma ahju ja kuuma ahju kütmisel. Tabelist on näha et NH₃ emissioonivood olid külma ahju kütmisel süütamise ja põlemisfaasis suuremad, aga kustumisfaasis väiksemad kui kuuma ahju kütmisel. Katsete 28, 30, 32 süütamisfaasi keskmine NH₃ masskulu on 0,02 mg/s võrra suurem katsete 29, 31, 33 keskmisest. Põlemisfaasis on kuuma ahju kütmisel NH₃ masskulu keskmiselt 0,01 mg/s võrra väiksem. Kustumisfaasis saadi külma ahju kütmisel keskmiselt 0,01 mg/s võrra väiksem tulemus. Emiteeritud NH₃ kogumasse võrreldes näeb, et külma ahju kütmisel on süütamis- ja põlemisfaasis suurem ning kustumisfaasis väiksem emiteeritud NH₃ kogus kui kuuma ahju kütmisel. Põlemisfaasis tekkis külma ahju kütmisel keskmiselt 0,01 g võrra rohkem NH₃-e kui kuuma ahju kütmisel. Kütuse massiühiku kohta oli emiteeritud NH₃ kogus suurem külma ahju kütmisel. Antud vahe on siiski väga väike ja eelkõige tingitud ühest suuremast katsetulemusest. Kui võrrelda keskmiseid koguseid, siis on näha, et kuuma ahju kütmisel tekkis antud emissiooni 0,01 g/kg vähem, mis jääb määramatuse sisse ja statistiliselt on tulemused võrdsed.

Tabel 3.11 NH₃ heitmed kuusega külma ja kuuma ahju kütmisel

Katsed	Külma ahju kütmine kuusega				Kuuma ahju kütmine kuusega			
	28	30	32	Keskmine	29	31	33	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	0,12	0	0	0,04±0,03	0,05	0	0	0,02±0,01
Põlemisfaas	0,05	0,03	0,01	0,03±0,01	0	0,03	0,04	0,02±0,01
Kustumisfaas	0,08	0	0,05	0,04±0,02	0,03	0,04	0,08	0,05±0,02
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	0,16	0	0	-	0,03	0	0	-
Põlemisfaas	0,15	0,08	0,02	0,08±0,04	0,01	0,08	0,12	0,07±0,03
Kustumisfaas	0,11	0,01	0,08	-	0,05	0,09	0,12	-
Summaarne emissioon, g	0,42	0,09	0,1	0,2	0,1	0,17	0,24	0,17
Kütuse mass, kg	5,49	5,32	6,32	5,71	6,35	6,5	5,9	6,25
Eriemissioon, g/kg	0,07	0,02	0,04	0,04±0,02	0,02	0,03	0,04	0,03±0,01

Tabel 3.12 on kujutatud CH₄ emissioonid kuusega külma ahju ja kuuma ahju kütmisel. Tabelist on näha, et CH₄ emissioonivood olid külma ahju kütmisel süütamise ja kustumisfaasis suuremad, aga põlemise faasis väiksemad kui kuuma ahju kütmisel. Seda on näha ka katsete keskmiseid tulemusi võrreldes. Katsete 28, 30, 32 süütamisfaasi keskmine CH₄ masskulu on 0,10 mg/s võrra suurem katsete 29, 31, 33 keskmisest. Põlemisfaasis on kuuma ahju kütmise CH₄ masskulu keskmiselt 0,39 mg/s võrra suurem. Antud vahe on tingitud katsetulemuste trendist. Kustumisfaasis on külma ahju kütmisel keskmiselt 0,78 mg/s võrra suurem emissioonivoog, mis on tingitud ühest suurest katseväärtusest. Kui võrrelda emiteeritud CH₄ kogumassi, siis näeb, et külma ahju kütmisel tekib süütamis- ja kustumisfaasis suurem ning põlemisfaasis väiksem CH₄ kogus kui kuuma ahju kütmisel. Külma ahju kütmisel põlemisfaasis emiteeriti keskmiselt 1,27 g vähem CH₄- ja kuuma ahju kütmise keskmisest tulemusest ning seda arvestatavat vahe kirjeldab katsegruppide trend. Kütuse massiühiku kohta oli CH₄ kogused suuremad külma ahju kütmisel. Kui võrrelda keskmiseid koguseid, siis on näha, et kuuma ahju kütmisel oli see 0,09 g/kg väiksem, mis jääb ka määramatuse sisse.

Tabel 3.12 CH₄ heitmed kuusega külma ja kuuma ahju kütmisel

Katse	Külma ahju kütmine kuusega				Kuuma ahju kütmine kuusega			
	28	30	32	Keskmine	29	31	33	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	0,54	1,19	1,13	0,95±0,22	0,79	0,95	0,81	0,85±0,09
Põlemisfaas	1,21	1,4	1,13	1,25±0,14	1,68	1,64	1,6	1,64±0,15
Kustumisfaas	0,17	0,37	3,06	1,20±0,94	0,17	0,44	0,65	0,42±0,14
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	0,75	0,21	0,81	-	0,52	0,34	0,15	-
Põlemisfaas	3,56	4,28	3,65	3,83±0,42	5,55	5,03	4,71	5,10±0,53
Kustumisfaas	0,24	0,56	4,59	-	0,32	0,86	0,93	-
Summaarne emissioon, g	4,55	5,05	9,05	6,22	6,4	6,23	5,78	6,14
Kütuse mass, kg	5,49	5,32	6,32	5,71	6,35	6,5	5,9	6,25
Eriemissioon, g/kg	0,83	0,95	1,43	1,07±0,21	1,01	0,96	0,98	0,98±0,09

Tabel 3.13 on kujutatud TOC emissioonid kuusega külma ahju ja kuuma ahju kütmisel. Tabelist on näha, et TOC emissioonivood olid külma ahju kütmisel süütamise ja kustumisfaasis suuremad, aga põlemisfaasis väiksemad kui kuuma ahju kütmisel. Katsete 28, 30, 32 süütamisfaasi keskmine masskulu on 0,46 mg/s võrra suurem katsete 29, 31, 33 keskmisest. Põlemisfaasis on kuuma ahju kütmisel TOC masskulu keskmiselt 0,78 mg/s võrra suurem. See märkimisväärne vahe on tingitud katsetulemuste trendist. Kustumisfaasis on külma ahju kütmisel keskmiselt 1,38 mg/s võrra suurem emissioonivoog. See samuti märkimisväärne erinevus on tingitud aga ühest suuremast katseväärtusest. Emitteeritud TOC kogumasse võrreldes on näha, et külma ahju kütmisel on antud parameeter süütamis- ja kustumisfaasis suurem ning põlemisfaasis väiksem kui kuuma ahju kütmisel. Kuuma ahju kütmisel tekib põlemisfaasis antud emissiooniatet keskmiselt 2,52 g rohkem ja seda arvestatavat vahe kirjeldab katsegruppide trend. TOC kogused kütuse massiühiku kohta olid suuremad külma ahju kütmisel. Kui võrrelda keskmiseid, siis on näha, et kuuma ahju kütmisel oli TOC kogus 0,18 g/kg väiksem ning jääb ühtlasi ka määramatuse sisse.

Tabel 3.13 TOC heitmed kuusega külma ja kuuma ahju kütmisel

Katse	Külma ahju kütmine kuusega				Kuuma ahju kütmine kuusega			
	28	30	32	Keskmine	29	31	33	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	1,81	3,09	2,9	2,60±0,46	2,05	2,64	1,73	2,14±0,32
Põlemisfaas	2,21	2,73	2,05	2,33±0,29	3,42	3,04	2,89	3,11±0,31
Kustumisfaas	0,45	1,05	5,91	2,47±1,74	0,38	1,63	1,27	1,09±0,38
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	2,5	0,56	2,09	-	1,35	0,95	0,31	-
Põlemisfaas	6,49	8,34	6,64	7,16±0,86	11,27	9,29	8,48	9,68±1,18
Kustumisfaas	0,61	1,58	8,86	-	0,74	3,23	1,83	-
Summaarne emissioon, g	9,6	10,48	17,6	12,56	13,36	13,46	10,62	12,48
Kütuse mass, kg	5,49	5,32	6,32	5,71	6,35	6,5	5,9	6,25
Eriemissioon, g/kg	1,75	1,97	2,78	2,17±0,37	2,1	2,07	1,8	1,99±0,20

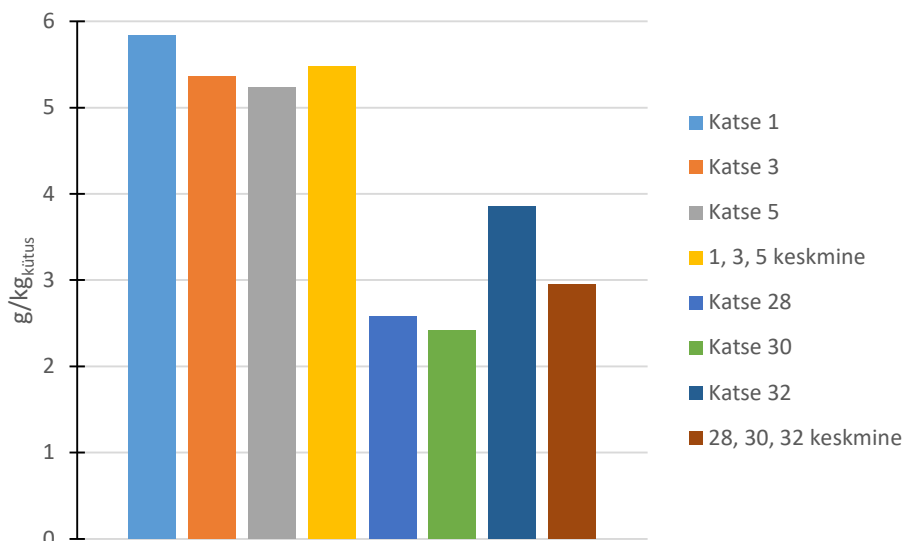
Tabel 3.14 on kujutatud LOÜ emissioonid kuusega külma ahju ja kuuma ahju kütmisel. Tabelist on näha, et LOÜ emissioonivood olid külma ahju kütmisel süütamise ja kustumisfaasis suuremad, aga põlemise faasis väiksemad kui kuuma ahju kütmisel. Seda on näha ka katsete keskmiseid tulemusi võrreldes. Katsete 28, 30, 32 süütamisfaasi keskmine LOÜ masskulu on 0,32 mg/s võrra suurem katsete 29, 31, 33 keskmisest. Põlemisfaasis on kuuma ahju kütmise LOÜ masskulu keskmiselt 0,23 mg/s võrra kõrgem, kuid kustumisfaasis on antud parameeter 0,27 mg/s võrra suurem külma ahju kütmisel. Emiteeritud LOÜ kogumasse võrreldes näeb, et külma ahju kütmisel on see süütamis- ja kustumisfaasis suurem ning põlemisfaasis väiksem kui kuuma ahju kütmisel. Põlemisfaasis oli kuuma ahju kütmisel keskmine emiteeritud LOÜ kogus 0,75 g suurem külma ahju kütmise keskmisest. Kütuse massiühiku kohta oli tekkinud LOÜ kogus suurem külma ahju kütmisel. Kui võrrelda keskmiseid koguseid, siis on näha, et kuuma ahju kütmisel oli LOÜ kogus 0,05 g/kg madalam, mis jääb samuti määramatuse sisse.

Tabel 3.14 LOÜ heitmed kuusega külma ja kuuma ahju kütmisel

Katse	Külma ahju kütmine kuusega				Kuuma ahju kütmine kuusega			
	28	30	32	Keskmine	29	31	33	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	1,05	1,42	1,32	1,27±0,19	0,94	1,32	0,59	0,95±0,24
Põlemisfaas	0,51	0,77	0,47	0,58±0,12	1,06	0,73	0,65	0,81±0,16
Kustumisfaas	0,2	0,53	1,6	0,78±0,43	0,15	1,02	0,37	0,51±0,27
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	1,46	0,26	0,95	-	0,62	0,47	0,11	-
Põlemisfaas	1,51	2,35	1,53	1,80±0,35	3,5	2,25	1,9	2,55±0,58
Kustumisfaas	0,28	0,8	2,41	-	0,28	2,02	0,53	-
Summaarne emissioon, g	3,24	3,4	4,89	3,84	4,4	4,74	2,53	3,89
Kütuse mass, kg	5,49	5,32	6,32	5,71	6,35	6,5	5,9	6,25
Eriemissioon, g/kg	0,59	0,64	0,77	0,67±0,10	0,69	0,73	0,43	0,62±0,12

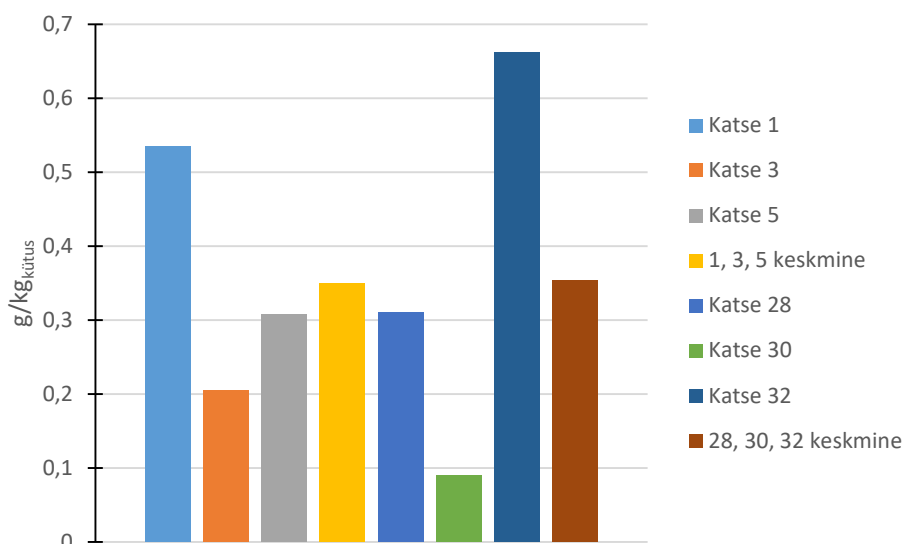
3.3 Lepaga ja kuusega külma ahju kütmise võrdlus

Tabel 3.1 ja Tabel 3.8 on kujutatud vastavalt NO_x emissioonid lepaga või kuusega külma ahju kütmisel. Tabelitest on näha, et NO_x emissioonivood olid lepaga kütmisel kõikides faasides suuremad kui kuusega kütmisel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi NO_x keskmine masskulu on 4,76 mg/s ehk ligikaudu poole võrra suurem katsete 28, 30, 32 keskmisest. Põlemisfaasis on lepaga kütmisel NO_x masskulu keskmiselt 3,67 mg/s võrra suurem, mis on samuti märkimisväärne vahe. Kustumisfaasis on antud parameeter lepaga kütmisel keskmiselt 1,05 mg/s võrra suurem. Emitteeritud NO_x kogumassi korral näeb samuti, et lepaga kütmisel oli NO_x mass suurem kui kuusega kütmisel. Kõige väiksem oli vahe kustumisperioodis. Märkimisväärne on emiteeritud NO_x masside vahe põlemisperioodis, kus lepaga kütmisel tekkis antud emissioonainet 7,77 g võrra rohkem. NO_x kogused põlemisgaasides kütuse massiühiku kohta on näidatud Joonis 3.1. Kui võrrelda keskmiseid emiteeritud koguseid, siis on näha, et kuusega kütmisel oli see 2,53 g/kg väiksem. Saadud vahe on märkimisväärne ja tingitud ilmselt lepa kui kütuse suuremast lämmastiku sisaldusest.



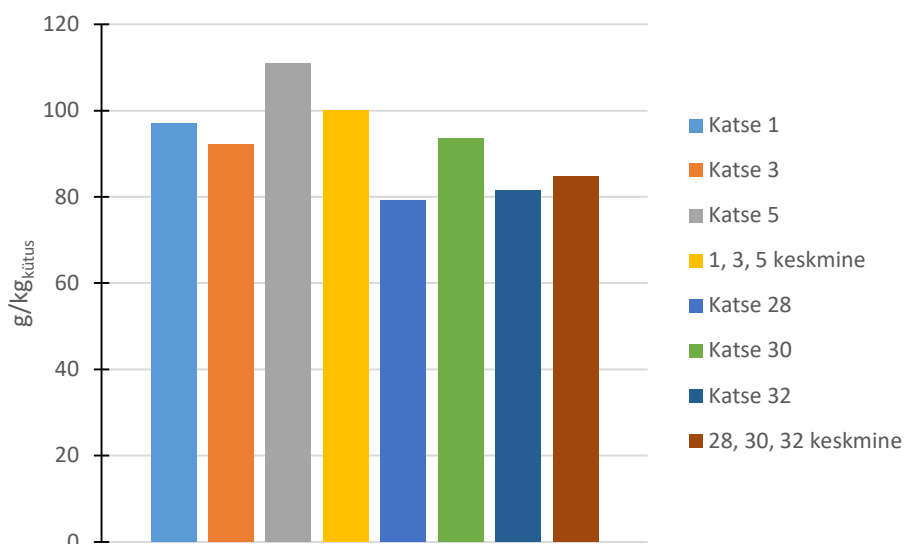
Joonis 3.1 Emiteeritud NO_x kogused g/kg_{kütus} lepaga või kuusega külma ahju kütisel

Tabel 3.2 ja Tabel 3.9 leiab SO₂ emissioonid vastavalt lepaga või kuusega külma ahju kütisel. Tabelitest on näha, et SO₂ emissioonivood olid lepaga kütisel süütamis- ja põlemisfaasis suuremad ning kustumisfaasis väiksemad kui kuusega kütisel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi SO₂ masskulu on keskmiselt 0,30 mg/s võrra suurem katsete 28, 30, 32 keskmisest. Põlemisfaasis on lepaga kütisel tekkiva SO₂ keskmine masskulu 0,07 mg/s võrra suurem. Kustumisfaasis saadi kuusega kütisel keskmiselt 0,24 mg/s võrra suurem SO₂ masskulu. Emiteeritud SO₂ kogumasse võrreldes selgub, et lepaga kütisel olid need süütamise ja põlemise perioodides natuke suuremad kui kuusega kütisel. Kustumisfaasis oli antud parameeter märkmisväärselt väiksem, kuigi selle tingis ühe katse palju suurem väärtus. Põlemisperioodi keskmised emiteeritud koguste vahed on väiksed, lepaga kütisel saadi 0,14 g võrra suurem tulemus. SO₂ kogused kütuse massiühiku kohta (Joonis 3.2) on mõlema puuliigi kütisel sarnased – keskmiste tulemuste vahe on 0,03 g/kg, mis näitab, et ümardatult ning määramatuse järgi on tulemused võrdsed. Ilmselt on puuliikide väävlisisaldus ligilähedane.



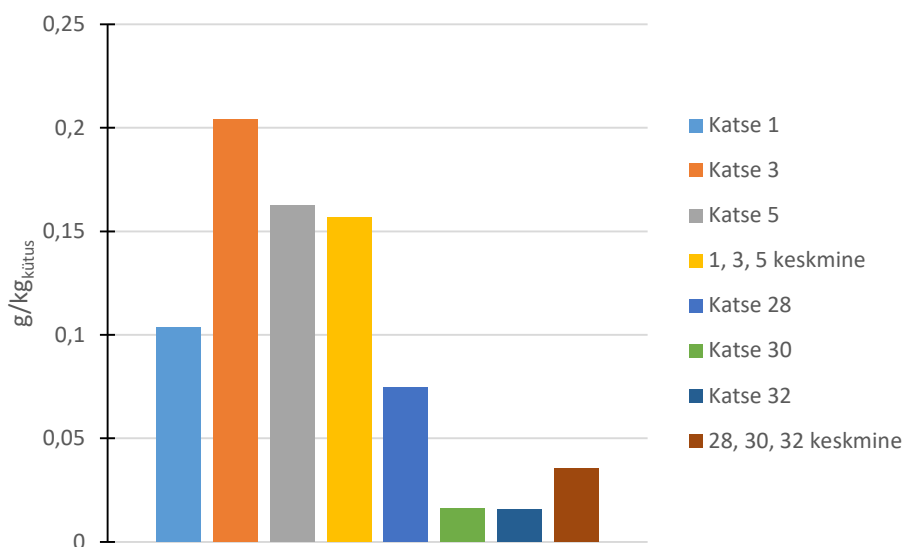
Joonis 3.2 Emiteeritud SO₂ kogused g/kg_{kütus} lepaga või kuusega külma ahju kütmisel

Tabel 3.3 ja Tabel 3.10 leiab CO emissioonid vastavalt lepaga või kuusega külma ahju kütmisel. Tabelitest on näha, et CO emissioonivood olid lepaga kütmisel kõikides faasides suuremad kui kuusega kütmisel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine CO masskulu on 1,06 mg/s võrra suurem katsete 28, 30, 32 keskmisest. Põlemisfaasis on lepaga kütmisel tekkiva CO keskmine masskulu 14,33 mg/s võrra suurem. Kustumisfaasis on antud parameeter lepaga kütmisel 26,24 mg/s võrra suurem. Seda märkimisväärset vahe iseloomustab katsete trend. Emiteeritud CO kogumassi korral oli see lepaga kütmisel süütamise ja põlemise perioodis väiksem, aga kustumise faasis suurem kui kuusega kütmisel. Kustumisperioodi keskmine emiteeritud koguse vahe on küllaltki suur – lepaga kütmisel saadi 65,1 g võrra suurem tulemus. CO emissioonid kütuse massiühiku kohta on näidatud Joonis 3.3. Kui võrrelda keskmiseid koguseid, siis on näha, et lepaga kütmisel oli tulemus 15,26 g/kg kohta suurem, mis on üsna märkimisväärne vahe ja võib viidata, et kuuse struktuur soodustab ahju tingimustes täielikumat põlemist. Näiteks kuusk on vaigune ja põleb praksudes valusa tulega erinevalt lepast.



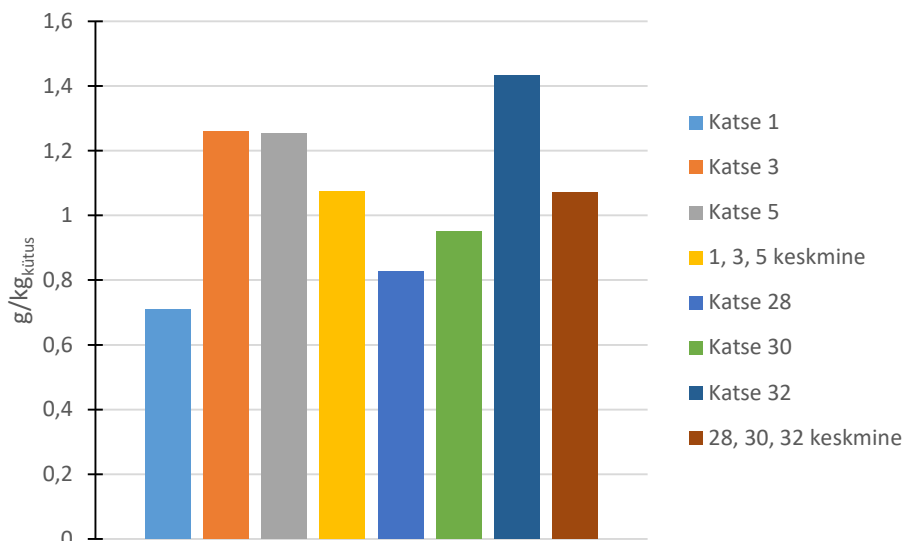
Joonis 3.3 Emiteritud CO kogused g/kg_{kütus} lepaga või kuusega külma ahju kütmisel

Tabel 3.4 ja Tabel 3.11 on kujutatud NH₃ emissioonid vastavalt lepaga või kuusega külma ahju kütmisel. Tabelitest on näha, et NH₃ emissioonivood olid lepaga kütmisel süütamisfaasis natuke väiksemad, aga põlemis- ja kustumisfaasis tunduvalt suuremad kui kuusega kütmisel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi NH₃ keskmine masskulu on 0,01 mg/s võrra väiksem katsete 28, 30, 32 keskmisest. Põlemisfaasis ning kustumisfaasis on lepaga kütmisel NH₃ keskmine masskulu vastavalt 0,11 mg/s ja 0,23 mg/s võrra suurem. Neid märkimisväärseid vahesid iseloomustab katsete trend. Emiteritud NH₃ kogumassi võrdlemisel on näha, et lepaga kütmisel oli see süütamise perioodis väiksem, aga põlemise ja kustumise faasis suurem kui kuusega kütmisel. Põlemisperioodis tekkis lepaga kütmisel keskmiselt 0,29 g võrra rohkem NH₃-me. Emiteritud NH₃ kogused kütuse massiühiku kohta (Joonis 3.4) olid suuremad lepaga kütmisel. Keskmiseid koguseid võrreldes on näha, et lepaga kütmisel saadi 0,12 g/kg võrra suurem tulemus. See on üsna märkimisväärne vahe ja ilmselt tingitud lepa suuremast lämmastiksisaldusest.



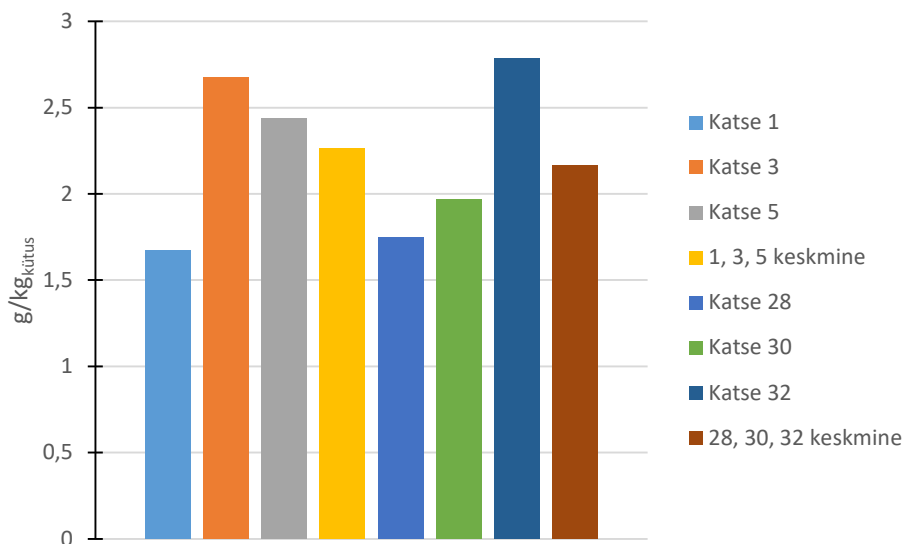
Joonis 3.4 Emiteeritud NH₃ kogused g/kg_{kütus} lepaga või kuusega külma ahju kütmisel

Tabel 3.5 ja Tabel 3.12 leiab CH₄ emissioonid lepaga või kuusega külma ahju kütmisel. Tabelitest on näha, et CH₄ emissioonivood olid lepaga kütmisel süütamis- ja põlemisfaasis suuremad, aga kustumisfaasis väiksemad kui kuusega kütmise katsetel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine CH₄ masskulu on 0,14 mg/s võrra suurem katsete 28, 30, 32 keskmisest. Põlemis- ning kustumisfaasis on lepaga kütmisel keskmine CH₄ masskulu vastavalt 0,32 mg/s võrra suurem 0,59 mg/s võrra väiksem kui kuusega kütmistel. Emiteeritud CH₄ kogumassi korral on see lepaga kütmisel süütamise ja põlemise perioodis suurem, aga kustumise faasis väiksem kui kuusega kütmisel. Põlemisfaasis keskmiselt tekkis antud emissiooniatmet lepaga kütmisel 0,21 g võrra rohkem. Emiteeritud CH₄ kogused kütuse massiühiku kohta (Joonis 3.5) olid sarnased – lepaga kütmisel saadi keskmiselt 0,004 g/kg suurem tulemus, aga see on määramatuse sees ja statistiliselt on tulemused võrdsed.



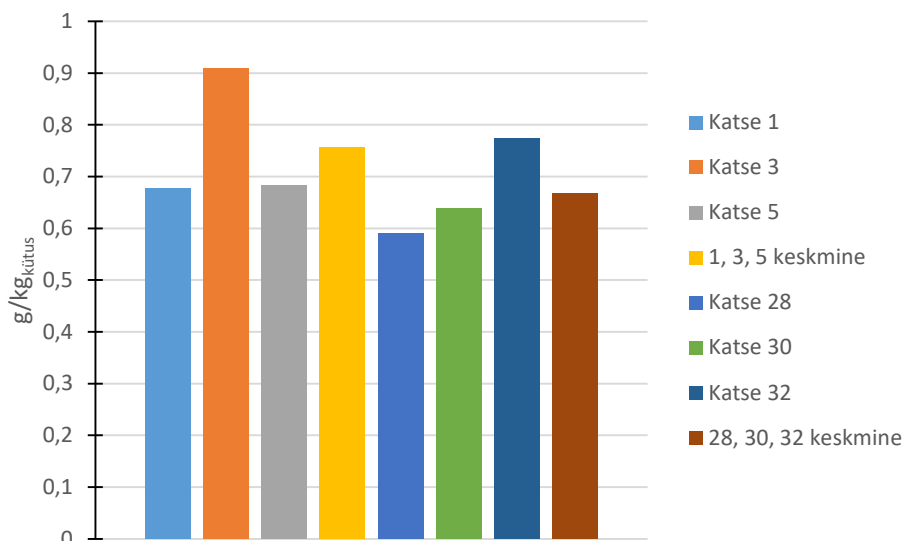
Joonis 3.5 Emiteeritud CH₄ kogused g/kg_{kütus} lepaga või kuusega külma ahju kütmisel

Tabel 3.6 ja Tabel 3.13 leiab TOC emissioonid lepaga või kuusega külma ahju kütmisel. Tabelitest on näha, et TOC emissioonivood olid lepaga kütmisel süütamis- ja põlemisfaasis suuremad, aga kustumisfaasis väiksemad kui kuusega kütmise katsetel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine TOC masskulu on 1,10 mg/s võrra suurem katsete 28, 30, 32 keskmisest, mis on märkimisväärne vahe. Põlemis- ning kustumisfaasis on lepaga kütmisel keskmine TOC masskulu vastavalt 0,53 mg/s võrra suurem ja 0,95 mg/s võrra väiksem kui kuusega kütmisel. Tekkinud TOC kogumassi korral oli see lepaga kütmisel süütamise ja põlemise perioodis suurem, aga kustumise faasis väiksem. Põlemisfaasis eraldus antud emissiooniainet lepaga kütmisel 0,18 g võrra keskmiselt rohkem. Kütuse massiühiku kohta emiteeritud TOC kogused on natuke suuremad lepaga kütmisel (Joonis 3.6). Kui võrrelda keskmiseid koguseid, siis on antud parameeter lepaga kütmisel 0,09 g/kg suurem, mis on väike vahe määramatuse sees.



Joonis 3.6 Emiteeritud TOC kogused g/kg_{kütus} lepaga või kuusega külma ahju kütmisel

Tabel 3.7 ja Tabel 3.14 leiab LOÜ emissioonid lepaga või kuusega külma ahju kütmisel. Tabelitest on näha, et LOÜ emissioonivood olid lepaga kütmisel süütamis- ja põlemisfaasis suuremad, aga kustumisfaasis väiksemad kui kuusega kütmisel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine LOÜ masskulu on 0,9 mg/s võrra suurem katsete 28, 30, 32 keskmisest ja see on märkimisväärne vahe. Põlemis- ning kustumisfaasis on lepaga kütmisel vastavalt 0,08 mg/s võrra suurem ja 0,11 mg/s võrra väiksem tulemus kui kuusega kütmisel. Emiteeritud LOÜ kogumassi puhul on näha, et lepaga kütmisel oli antud parameeter süütamise perioodis suurem, aga põlemise ja kustumise faasis väiksem kui kuusega kütmisel. Põlemise perioodi keskmine tekkinud LOÜ koguse vahe on väike, lepaga kütmisel 0,11 g võrra väiksem. Kütuse massiühiku kohta oli emitteeritud LOÜ kogus suurem lepaga kütmisel (Joonis 3.7). Kui võrrelda keskmiseid koguseid, siis lepaga kütmisel oli see 0,09 g/kg suurem. Antud vahe jääb siiski määramatuse sisse.



Joonis 3.7 Emiteeritud LOÜ kogused g/kg_{kütus} lepaga või kuusega külma ahju kütmisel

3.4 Külma ahju lepaga kütmise võrdlus alumise põlemisõhu ava avatuse järgi

L1.1 on kujutatud NO_x emissioonid lepaga külma ahju kütmisel täielikult avatud ja pool-avatud põlemisõhu avaga. Tabelist on näha, et NO_x emissioonivood olid täielikult avatud õhuavaga kütmisel kõikides faasides pool-avatud õhuavaga saadud tulemustest suuremad, ainult kustumisfaasis oli vahe üliväike. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine NO_x masskulu on 5,87 mg/s võrra suurem katsete 22, 24, 26 keskmisest ehk pool-avatud õhuavaga on antud parameeter rohkem kui poole väiksem. Põlemisfaasis on täielikult avatud õhuavaga kütmise NO_x keskmine masskulu 1,58 mg/s võrra suurem ja see on märkimisväärne vahe. Kustumisfaasis saadi täielikult avatud õhuavaga kütmisel 0,04 mg/s võrra suurem tulemus kui pool-avatud õhuavaga kütmisel. Emiteeritud NO_x kogumassi korral on täielikult avatud õhuavaga kütmisel samuti antud parameeter igas perioodis suurem, kõige väiksem oli erinevus kustumisperioodis. Põlemisfaasi keskmiseid emiteeritud koguseid võrreldes leiti, et täielikult avatud õhuavaga kütmisel on kogumass 1,85 g võrra suurem kui pool-avatud õhuavaga kütmisel. Kütuse massiühiku kohta tekkis NO_x-i rohkem täielikult avatud õhuava puhul. Katsete keskmiseid koguseid võrreldes on näha, et pool-avatud õhuavaga kütmisel oli emiteeritud NO_x kogus 1,29 g/kg väiksem, mis on märkimisväärne vahe. See võib olla tingitud sellest, et väiksema koguse põlemisõhu pääsemisel koldesse toimus põlemine madalamatel temperatuuridel ja termiliste NO_x-ide tekkimise võimalus oli väiksem.

L1.2 on kujutatud SO₂ emissioonid lepaga külma ahju kütmisel täielikult avatud ja pool-avatud põlemisõhu avaga. Tabelist on näha, et SO₂ emissioonivood olid täielikult avatud

õhuavaga kütisel süütamis- ja põlemisfaasis suuremad, aga kustumisfaasis väiksemad kui pool-avatud õhuavaga kütisel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine SO₂ masskulu on 0,45 mg/s võrra suurem katsete 22, 24, 26 keskmisest. Põlemis- ning kustumisfaasis on täielikult avatud õhuavaga kütisel keskmine SO₂ masskulu vastavalt 0,09 mg/s võrra suurem ja 0,37 mg/s võrra väiksem kui pool-avatud õhuavaga kütisel. Emiteeritud SO₂ kogumassi korral näeb, et täielikult avatud õhuavaga kütisel oli samuti tekkinud SO₂ mass süütamise ja põlemise faasis suurem ja kustumisperioodis väiksem. Märkimisväärselt ehk 0,19 g suurem on põlemisfaasi keskmine emitteeritud SO₂ kogus täielikult avatud õhuavaga kütisel. Kütuse massiühiku kohta saadi suurem tulemus pool-avatud õhuavaga kütisel. Kui võrrelda keskmiseid emitteeritud SO₂ koguseid, siis on näha, et pool-avatud õhuavaga kütisel oli see 0,02 g/kg suurem. Antud vahe on üsna väike ja määramatuse sees.

L1.3 on kujutatud CO emissioonid lepaga külma ahju kütisel täielikult avatud ja pool-avatud põlemisõhu avaga. Tabelist on näha, et CO emissioonivood olid täielikult avatud õhuavaga kütisel süütamis- ja kustumisfaasis suuremad, aga põlemisfaasis natuke väiksemad kui pool-avatud õhuavaga kütisel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine CO masskulu on 4,36 mg/s võrra suurem katsete 22, 24, 26 keskmisest. Põlemis- ning kustumisfaasis saadi täielikult avatud õhuavaga kütisel vastavalt 0,53 mg/s võrra väiksem ja 51,58 mg/s võrra suurem tulemus. Emitteeritud CO kogumasse võrreldes selgub, et täielikult avatud õhuavaga kütisel olid need samuti süütamise ja kustumise perioodis suuremad ning põlemisperioodis väiksemad kui pool-avatud õhuavaga kütisel. Põlemisperioodi keskmine eraldunud CO koguse vahe oli täielikult avatud õhuavaga kütisel keskmiselt 47,17 g väiksem. Kütuse massiühiku kohta oli emitteeritud CO kogus suurem täielikult avatud õhuavaga kütisel. Kui võrrelda keskmiseid CO koguseid, siis pool-avatud õhuavaga kütisel saadi 10,22 g/kg väiksem tulemus, mis on üsna märkimisväärne vahe. See võis olla tingitud sellest, et väiksem põlemisõhu kogus, mis pääses koldesse, mõjutas ka tõmmet korstnasse ja rohkem CO osakesi jõudis põlemistsoonis täielikult põleda.

L1.4 on kujutatud NH₃ emissioonid lepaga külma ahju kütisel täielikult avatud ja pool-avatud põlemisõhu avaga. Tabelist on näha, et NH₃ emissioonivood olid täielikult avatud õhuavaga kütisel kõikides faasides suuremad kui pool-avatud õhuavaga kütisel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine NH₃ masskulu on 0,02 mg/s võrra suurem katsete 22, 24, 26 keskmisest. Põlemis- ning kustumisfaasis on antud parameeter täielikult avatud õhuavaga kütisel vastavalt 0,003 mg/s ja 0,17 mg/s võrra suurem. Emitteeritud NH₃ kogumassi korral on näha, et täielikult avatud õhuavaga kütisel oli see süütamise ja kustumise perioodis suurem ja põlemisperioodis väiksem kui pool-avatud õhuavaga kütisel. Põlemisperioodis tekkis antud emissiooniainet täielikult avatud õhuavaga

kütisel keskmiselt 0,04 g vähem. Emiteeritud NH₃ kogus kütuse massiühiku kohta oli suurem täielikult avatud õhuavaga kütisel. Keskmiste väärtuste võrdlemisel on näha, et pool-avatud õhuavaga kütisel oli see 0,05 g/kg väiksem.

L1.5 on kujutatud CH₄ emissioonid lepaga külma ahju kütisel täielikult avatud ja pool-avatud põlemisõhu avaga. Tabelist on näha, et CH₄ emissioonivood olid täielikult avatud õhuavaga kütisel kõikides faasides suuremad kui pool-avatud õhuavaga kütisel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine CH₄ masskulu on 0,58 mg/s võrra suurem kui katsete 22, 24, 26 keskmine. Põlemis- ning kustumisfaasis on täielikult avatud õhu avaga kütisel mõõtetulemustest saadud CH₄ masskulu vastavalt 0,82 mg/s ja 0,19 mg/s suurem kui pool-avatud õhu avaga kütisel. Emiteeritud CH₄ kogumasse võrreldes on näha, et täielikult avatud õhuavaga kütisel olid need samuti kõikides perioodides suuremad. Põlemisperioodis oli täielikult avatud õhuavaga kütisel keskmine CH₄ kogus 1,81 g võrra suurem kui pool-avatud õhu avaga kütisel. Kütuse massiühiku kohta emiteeriti CH₄-ja rohkem täielikult avatud õhuavaga kütisel. Katsete keskmiseid emissiooniaine koguse väärtuseid võrreldes on näha, et pool-avatud õhuavaga kütisel oli see 0,5 g/kg väiksem. Antud vahe on arvestatav ning võis olla tingitud ka sellest, et väiksema põlemisõhu koguse pääsemine koldesse vähendas korstna tõmmet ja suurem osa CH₄ osakekestest jõudis täielikult põleda, sest viibimisaeg põlemistsoonis oli pikem.

L1.6 on kujutatud TOC emissioonid lepaga külma ahju kütisel täieleikult avatud ja pool-avatud põlemisõhu avaga. Tabelist on näha et, TOC emissioonivood olid täielikult avatud õhuavaga kütisel kõikides faasides suuremad kui pool-avatud õhuavaga kütisel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine TOC masskulu on 2,26 mg/s võrra suurem katsete 22, 24, 26 keskmisest. Põlemis- ning kustumisfaasis saadi täielikult avatud õhuavaga kütisel vastavalt 1,62 mg/s ja 0,18 mg/s võrra suuremad tulemused. Emiteeritud TOC kogumassi puhul on näha, et täielikult avatud õhuavaga kütisel oli samuti antud väärtus kõikides perioodides suurem kui pool-avatud õhuavaga kütisel. Põlemisperioodis emiteeritud TOC keskmine kogumass oli täielikult avatud õhu avaga kütisel 3,63 g suurem. Kütuse massiühiku kohta olid tekkinud TOC kogused suuremad täielikult avatud õhuavaga kütisel. Kui võrrelda keskmiseid väärtuseid, siis on näha, et pool-avatud õhuavaga kütisel saadi 1,10 g/kg väiksem tulemus. See on arvestatav vahe ning põhjus võib olla sarnane CH₄ madalama heitmega.

L1.7 on kujutatud LOÜ emissioonid lepaga külma ahju kütisel täielikult avatud ja pool-avatud põlemisõhu avaga. Tabelist on näha, et LOÜ emissioonivood olid täielikult avatud õhuavaga kütisel süütamis- ja põlemisfaasides suuremad, aga kustumisfaasis väiksemad kui pool-avatud õhuavaga kütisel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine LOÜ masskulu on 1,44 mg/s võrra suurem katsete 22, 24, 26 keskmisest. Põlemis- ning kustumisfaasis oli LOÜ keskmine masskulu täielikult avatud õhuavaga kütisel vastavalt 0,47 mg/s võrra

suurem ja 0,07 mg/s võrra väiksem kui pool-avatud õhuavaga kütmisel. Emiteeritud LOÜ kogumasse võrreldes on näha, et täielikult avatud õhuavaga kütmisel oli antud parameeter süütamis- ja põlemisperioodides suurem ning kustumisperioodis väiksem. Põlemisperioodis tekkis täielikult avatud õhuavaga kütmisel keskmiselt 1,11 g rohkem LOÜ-d kui pool-avatud õhuavaga kütmisel. Kütuse massiühiku kohta oli emiteeritud LOÜ kogus suurem täielikult avatud õhuavaga kütmisel. Kui võrrelda keskmiseid koguseid, siis on näha, et pool-avatud õhuavaga kütmisel oli see 0,40 g/kg väiksem. See on arvestatav vahe ning põhjus võib olla sama, mis CH₄ ja TOC heitmetega.

3.5 Ülejäänud katsete võrdlus ja märkimisväärsemate tulemuste analüüs

Eelmistes peatükkides sai antud täpne ja põhjalik ülevaade valitud katsete erinevustest ja nende mõõdetud emissioonidest, et näidata, millised on suitsugaaside koostised puiduga ahju kütmisel. Selles peatükis toon välja ülejäänud katsete analüüsis kõige märkimisväärsemad tulemused, sealhulgas erinevaid süütekatsed ja millised on emissioonid kg kohta kui kütmisel enne kustumisaasta algust puid lisada.

3.5.1 Süütekatsed süütetableti ja ajalehega

Siin osas toon välja märkimisväärsemad heitmekoguste erinevused lepaga kütmisel süütamisaastal, kui üks katsete grupp kasutas süütamiseks süütetablette ja teine vanu ajalehti. Katsed 7, 8, 9 ja nende keskmine on süütetabletiga süütamise katsed ning 10, 11, 12 ja nende keskmine on ajalehega süütamise katsed.

L2.1 on kujutatud NO_x emissioonid süütetableti või vana ajalehega süütamisel. Tabelist on näha, et NO_x emissioonivood olid süütetabletiga süüdates kõrgemad, kui ajalehega süütamise NO_x emissioonivood. Seda on näha ka katsete keskmiseid tulemusi võrreldes. Katsete 7, 8, 9 keskmine NO_x masskulu on 1,25 mg/s võrra kõrgem katsete 10, 11, 12 keskmisest ja see on üsna märkimisväärne vahe. Emiteeritud NO_x kogumassi korral näeb, et süütetabletiga süütamisel oli tulemus suurem. Märkimisväärne on süütamisperioodi keskmine emissioonikoguse vahe – süütetabletiga süütamisel oli keskmine kogus 2,67 grammi võrra suurem kui vana ajalehega süütamisel. Vahe võis olla tingitud süütetableti lämmastikusisaldusest ja aeglasemast süütamisest, mis muutis selle perioodi pikemaks kui ajalehega süütamisel.

L2.2 on kujutatud CH₄ emissioonid süütetableti või vana ajalehega süütamisel. Tabelist on näha, et CH₄ emissioonivood olid süütetabletiga süüdates kõrgemad, kui ajalehega süüdates. Katsete 7, 8, 9 keskmine emissioon on 0,19 mg/s võrra suurem katsete 10, 11, 12 keskmisest. Emiteeritud CH₄ kogumassi puhul selgub, et süütetabletiga süütamisel oli

antud parameeter süütamisperioodis suurem. Süütamisperioodi keskmine emissioonikoguse vahe on märgatav – süütetabletiga süütamisel saadi 0,39 g suurem tulemus kui vana ajalehega süütamisel.

L2.3 on kujutatud TOC emissioonid süütetableti või vana ajalehega süütamisel. Tabelist on näha, et TOC emissioonivood olid süütetabletiga süütamisel suuremad, kui ajalehega süütamisel. Katsete 7, 8, 9 keskmine TOC masskulu on 0,92 mg/s võrra suurem katsete 10, 11, 12 keskmisest. Emiteeritud TOC kogumasse võrreldes selgub, et süütetabletiga süütamisel saadi süütamisperioodis suurem tulemus. Süütamisperioodi keskmine emissioonikoguse vahe on märgatav, süütetabletiga süütamisel on see 1,34 g võrra suurem kui vana ajalehega süütamisel.

L2.4 on kujutatud LOÜ emissioonid süütetableti või vana ajalehega süütamisel. Tabelist on näha, et LOÜ emissioonivood olid süütetabletiga süütamisel kõgemad kui ajalehega süütamisel. Seda on näha ka katsete keskmiseid tulemusi võrreldes. Katsete 7, 8, 9 keskmine LOÜ masskulu on 0,65 mg/s võrra suurem katsete 10, 11, 12 keskmisest. Süütamisperioodis tekkinud LOÜ kogumassi puhul on näha, et süütetabletiga süütamisel oli antud parameeter suurem. Süütamisperioodi keskmine emissioonikoguse vahe on märkimisväärne, süütetabletiga süütamisel saadi 0,8 g suurem tulemus kui vana ajalehega süütamisel.

3.5.2 Lepaga kütmise katsed põlemisfaasi lõpus 2 või 4 halu lisamisega

Siin osas toon välja märkimisväärsemad heitmekoguste erinevused külma ahju lepaga kütmisel, kui ühes katsegrupis lisati põlemisfaasi lõpus kaks halgu ja teises grupis neli halgu. Katsed 7, 8, 9 ja nende keskmine on kahe halu lisamisega katsed ning 10, 11, 12 ja nende keskmine on nelja halu lisamisega katsed. Puude lisamise mõju hindamiseks kasutan saadud põlemiskatsete koguemissiooni koguseid ja jagan selle kütmiseks katses kasutatud kütuse massiga. Nii saan tulemused, mis kajastavad palju konkreetset emissiooni tekkis kg kütuse kohta. Toon siin peatükis välja olulisemad erinevused katsegruppide vahel.

L2.5 on kujutatud SO₂ emissioonid kütuse massiühiku kohta külma ahju lepaga kütmisel põlemisfaasi lõpus kahe halu lisamisega või nelja halu lisamisega. Tabelist on näha, et kütuse massi kohta oli SO₂ emissioon suurem nelja halu lisamisega kütmisel. Kui võrrelda kahe halu ja nelja halu lisamisega katsete keskmiseid SO₂ emissiooni koguseid kütuse kg kohta, siis on näha, et kahe halu lisamisega kütmisel oli emiteeritud SO₂ kogus 0,24 g/kg väiksem. Antud vahe jääb napilt määramatuse sisse.

L2.6 on kujutatud CO emissioonid kütuse massiühiku kohta külma ahju lepaga kütmisel põlemisfaasi lõpus kahe halu lisamisega või nelja halu lisamisega. Tabelist on näha, et kütuse massi kohta oli CO emissioon natuke suurem nelja halu lisamisega kütmisel. Kui võrrelda keskmiseid emiteeritud CO koguseid kütuse kg kohta, siis on näha, et kahe halu lisamisega kütmisel saadi 3,77 g/kg väiksem tulemus, mis jääb määramatuse sisse.

L2.7 on kujutatud NH₃ emissioonid kütuse massiühiku kohta külma ahju lepaga kütmisel põlemisfaasi lõpus kahe halu lisamisega või nelja halu lisamisega. Tabelist on näha, et kütuse massi kohta oli NH₃ emissioon suurem kahe halu lisamisega kütmisel. Kui võrrelda keskmiseid emiteeritud NH₃ koguseid, siis on näha, et kahe halu lisamisega kütmisel saadi 0,09 g/kg suurem tulemus. Antud erinevus on märkimisväärne.

L2.8 on kujutatud CH₄ emissioonid kütuse massiühiku kohta külma ahju lepaga kütmisel põlemisperioodi lõpus kahe halu lisamisega ja nelja halu lisamisega. Tabelist on näha, et kütuse massi kohta oli CH₄ emissioon kõrgem kahe halu lisamisega kütmisel. Keskmiseid emiteeritud CH₄ koguseid võrreldes on näha, et kahe halu lisamisega kütmisel oli tulemus 0,58 g/kg suurem. See on märkimisväärne vahe, mis viitab, et nelja halu lisamine muutus põlemistoon suuremaks ja tõusis temperatuur, võimaldades seeläbi CH₄ täielikumat põlemist

L2.9 on kujutatud TOC emissioonid kütuse massiühiku kohta külma ahju lepaga kütmisel põlemisfaasi lõpus kahe halu lisamisega ja nelja halu lisamisega. Tabelist on näha, et kütuse massi kohta oli TOC emissioon suurem kahe halu lisamisega kütmisel. Kui võrrelda keskmiseid TOC koguseid kütuse kg kohta, siis on näha, et kahe halu lisamisega kütmisel oli tulemus 1,27 g/kg suurem. Põhjus võib olla sarnane CH₄ täielikuma põlemisega.

L2.10 on kujutatud LOÜ emissioonid kütuse massiühiku kohta külma ahju lepaga kütmisel põlemisperioodi lõpus kahe halu lisamisega ja nelja halu lisamisega. Tabelist on näha, et kütuse massi kohta oli LOÜ emissioon suurem kahe halu lisamisega kütmisel. Keskmiseid emiteeritud LOÜ koguseid võrreldes on näha, et kahe halu lisamisega kütmisel oli antud parameeter 0,45 g/kg suurem. Põhjus võib olla sarnane CH₄ ja TOC täielikuma põlemisega.

3.5.3 Süütekatsed ülevalt ja alt süütamisega

Siin osas toon välja märkimisväärsemad heitmekoguste erinevused süütamisfaasis lepaga kütmisel, kui katsete grupid kasutasid süütamiseks vanapaberit ja ühel juhul toimus süütamine puude pealt ning teisel juhul puude alt. Katsed 1, 3, 5 ja nende keskmine on ülalt süütamise katsed ning 13, 14, 15 ja nende keskmine on alt süütamise katsed.

L2.11 on kujutatud NO_x emissioonid süütamisfaasis vanapaberiga ülevalt või alt süütamisel. Tabelist on näha, et NO_x emissioonivood olid alt süütamisel suuremad kui ülalt

süütamisel. Seda on näha ka katsete keskmiseid tulemusi võrreldes. Katsete 1, 3, 5 keskmine NO_x masskulu on 4,02 mg/s võrra väiksem katsete 13, 14, 15 keskmisest. Emiteeritud NO_x kogumassi korral on näha, et ülalt süütamisel oli tulemus suurem. Märkimisväärne on süütamisperioodi keskmine emissioonikoguse vahe, ülalt süütamise katsete kogus oli 3,7 g võrra suurem kui alt süütamisel.

L2.12 on kujutatud SO₂ emissioonid süütamisperioodis vanapaberiga ülevalt või alt süütamisel. Tabelist on näha, et SO₂ emissioonivood olid alt süütamisel suuremad kui ülalt süütamisel. Katsete 1, 3, 5 keskmine SO₂ masskulu on 2,28 mg/s võrra väiksem katsete 13, 14, 15 keskmisest. Kui võrrelda emiteeritud SO₂ kogumasse, siis ülalt süütamisel oli tulemus suurem. Süütamisperioodi keskmine emissioonikoguse vahe on tühine, alt süütamisel on antud parameeter 0,05 g võrra väiksem kui ülalt süütamisel.

L2.13 on kujutatud CO emissioonid süütamisperioodis vanapaberiga ülevalt või alt süütamisel. Tabelist on näha, et CO emissioonivood olid alt süütamisel suuremad kui ülalt süütamisel. Katsete 1, 3, 5 keskmine süütamisfaasi CO masskulu on 28,02 mg/s võrra väiksem katsete 13, 14, 15 keskmisest, see on märkimisväärne vahe. Emiteeritud CO kogumassi korral on näha, et ülalt süütamisel oli tulemus suurem. Süütamisperioodi keskmine emissioonikoguse vahe on märkimisväärne. Ülalt süütamisel emiteeriti 4,43 g rohkem CO-d kui alt süütamisel.

L2.14 on kujutatud CH₄ emissioonid süütamisfaasis vanapaberiga ülevalt või alt süütamisel. Tabelist on näha et CH₄ emissioonivood olid alt süütamisel suuremad kui ülalt süütamisel. Seda on näha ka katsete keskmiseid tulemusi võrreldes. Katsete 1, 3, 5 keskmine süütamisfaasi CH₄ masskulu on 1,76 mg/s võrra väiksem katsete 13, 14, 15 keskmisest. Kui võrrelda emiteeritud CH₄ emissiooni kogumasse süütamisfaasis, siis selgub, et ülalt süütamisel oli kogus suurem. Märkimisväärne on süütamisperioodi keskmine emissioonikoguse vahe. Ülalt süütamisel saadi 0,21 g suurem tulemus kui alt süütamisel.

L2.15 on kujutatud TOC emissioonid süütamisfaasis vanapaberiga ülevalt või alt süütamisel. Tabelist on näha, et TOC emissioonivood olid alt süütamisel suuremad kui ülalt süütamisel. Katsete 1, 3, 5 keskmine süütamisfaasi TOC masskulu on 3,72 mg/s võrra väiksem katsete 13, 14, 15 keskmisest. Tabelist ja ka katsete keskmistest tulemustest on näha, et ülalt süütamisel oli emiteeritud TOC kogumass süütamise perioodis suurem kui alt süütamisel. Süütamisperioodi keskmine emissioonikoguse vahe on märkimisväärne. Ülalt süütamisel emiteeriti 1,05 g rohkem TOC-id kui alt süütamisel.

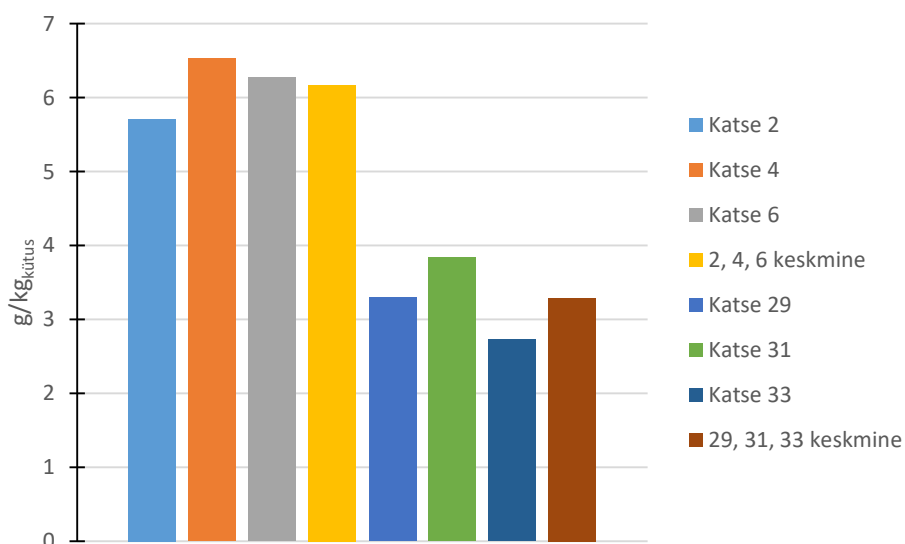
L2.16 on kujutatud LOÜ emissioonid süütamisperioodis vanapaberiga ülevalt või alt süütamisel. Tabelist on näha, et LOÜ emissioonivood olid alt süütamisel kõrgemad kui ülalt süütamisel. Seda on näha ka katsete keskmiseid tulemusi võrreldes. Katsete 1, 3, 5

keskmine süütamisfaasi LOÜ masskulu on 1,3 mg/s võrra väiksem katsete 13, 14, 15 keskmisest. Emiteeritud LOÜ kogumassi korral on näha, et ülalt süütamisel oli tulemus suurem. Märkimisväärne on süütamisperioodi keskmine emissioonikoguse vahe. Ülalt süütamise katsetel emiteeriti 0,73 g rohkem LOÜ-d kui alt süütamisel.

3.5.4 Lepaga ja kuusega kuuma ahju kütmise võrdlus

Siin osas toon välja märkimisväärsemad heitmekoguste erinevused kuuma ahju kütmisel lepaga või kuusega vahel kõigis kolmes perioodis. Katsed 2, 4, 6 ja nende keskmine on lepaga kütmise katsed ning 29, 31, 33 ja nende keskmine on kuusega kütmise katsed.

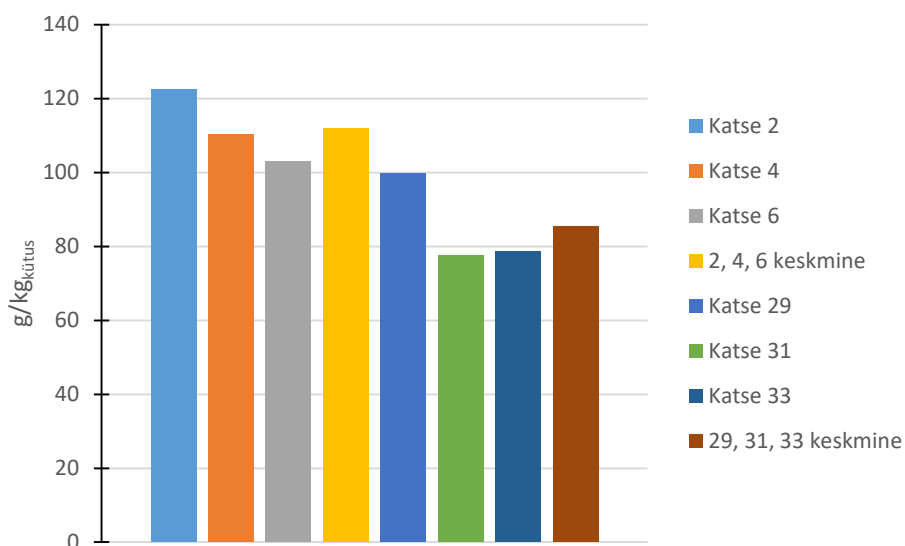
Tabel 3.1 ja Tabel 3.8 leiab NO_x emissioonid lepaga või kuusega kuuma ahju kütmisel. Tabelitest on näha, et NO_x emissioonivood olid lepaga kütmisel kõikides faasides suuremad kui kuusega kütmisel. Katsete 2, 4, 6 süütamisfaasi keskmine NO_x masskulu on 1,71 mg/s võrra suurem katsete 29, 31, 33 keskmisest. Põlemis- ning kustumisfaasis on lepaga kütmisel keskmised NO_x masskulud vastavalt 4,02 mg/s ja 4,28 mg/s suuremad. Need mõlemad on märkimisväärsed vahed. Emiteeritud NO_x kogumassi korral on tulemustest näha, et lepaga kütmisel oli see igas perioodis suurem kui kuusega kütmisel, kõige väiksem oli erinevus süütamisperioodis. Põlemisperioodi keskmine emiteeritud NO_x kogus oli lepaga kütmisel 11,44 g suurem. Kütuse massiühiku kohta saadi suuremad tulemused lepaga kütmisel (Joonis 3.8). Keskmiseid väärtuseid võrreldes on näha, et kuusega kütmisel oli saadud tulemus 2,88 g/kg väiksem. See on märkimisväärne vahe ja tuleneb kuuse kui kütuse väiksemast lämmastikisisaldusest.



Joonis 3.8 Emiteeritud NO_x kogused g/kg_{kütus} lepaga või kuusega kuuma ahju kütmisel

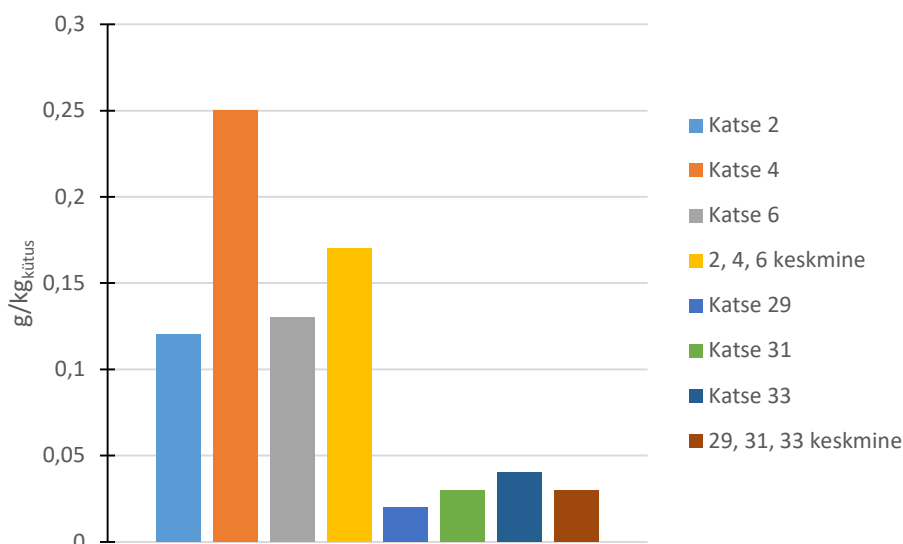
Tabel 3.3 ja Tabel 3.10 leiab CO emissioonid lepaga või kuusega kuuma ahju kütmisel. Tabelitest on näha, et CO emissioonivood olid lepaga kütmisel süütamisfaasis väiksemad,

aga põlemis- ja kustumisfaasis suuremad kui kuusega kütmisel. Katsete 2, 4, 6 süütamisfaasi keskmine CO masskulu on 7,48 mg/s võrra väiksem katsete 29, 31, 33 keskmisest. Põlemis- ning kustumisfaasis saadi lepaga kütmisel vastavalt 67,81 mg/s ja 32,78 mg/s suuremad tulemused kui kuusega kütmisel. Need mõlemad on märkimisväärsed vahed. Kütumiste käigus tekkinud CO kogumasse võrreldes näeb, et lepaga kütmisel oli antud parameeter süütamis- ja kustumisperioodis väiksem, kuid põlemisfaasis suurem kui kuusega kütmisel. Põlemisperioodis saadi lepaga kütmisel 198,41 g võrra suurem keskmine tulemus. Kütuse massiühiku kohta emiteeriti suurem CO kogus lepaga kütmisel (Joonis 3.9). Keskmiseid koguseid võrreldes on näha, et kuusega kütmisel saadi 26,56 g/kg väiksem tulemus, mis on märkimisväärne vahe ja võib viidata sellele, et vaigune kuusk põleb praksudes ahju tinigmustes täielikumalt kui lepp.



Joonis 3.9 Emiteeritud CO kogused g/kg_{kütus} lepaga või kuusega kuuma ahju kütmisel

Tabel 3.4 ja Tabel 3.11 kajastavad NH₃ emissioone lepaga või kuusega kuuma ahju kütmisel. Tabelitest on näha, et NH₃ emissioonivood olid lepaga kütmisel kõikides faasides suuremad kui kuusega kütmisel. Katsete 2, 4, 6 süütamisfaasi keskmine NH₃ masskulu on 0,07 mg/s võrra suurem katsete 29, 31, 33 keskmisest. Põlemis- ning kustumisfaasis saadi lepaga kütmisel vastavalt 0,15 mg/s ja 0,35 mg/s võrra suuremad keskmised tulemused. Põlemisgaasides sisalduva NH₃-e kogumasse võrreldes selgub, et lepaga kütmisel on antud parameeter samuti igas perioodis suurem. Kõige väiksem on erinevus süütamisperioodis. Põlemisperioodis emiteeriti lepaga kütmisel keskmiselt 0,44 g rohkem NH₃-e kui kuusega kütmisel. Kütuse massiühiku kohta saadi suurem kogus NH₃-e lepaga kütmisel (Joonis 3.10). Kui võrrelda keskmiseid koguseid, siis on näha, et kuusega kütmisel saadi 0,14 g/kg väiksem tulemus. See on arvestatav vahe ja näitab jällegi lepa suurema lämmastikusisalduse mõju



Joonis 3.10 Emitteeritud NH₃ kogused g/kg_{kütus} lepaga või kuusega kuuma ahju kütmisel

3.5.5 Külma ahju lepaga kütmise katsete võrdlus, kus tuharest on täiesti lahti või kinni

Siin osas toon välja märkimisväärsemad heitmekoguste erinevused külma ahju kütmisel lepaga, kui tuharest on avatud või kinni. Avatud tuharestiga pääseb primaarne põlemisõhk kütuseni ühtlaselt läbi tuharesti. Suletud asendis tuleb primaarne põlemisõhk osaliselt ühest pilust tuharesti ääres ja sekundaarõhk koldes olevate keraamiliste plaatide vahel paikneva horisontaalse pilu kaudu. See mõjutab, kuidas põlemisõhk pääseb kütusele ligi. Katsed 1, 3, 5 ja nende keskmine on katsed, kus tuharest on täielikult avatud ning 16, 18, 20 ja nende keskmine on katsed, kus tuharest on suletud.

L2.17 on kujutatud NO_x emissioonid lepaga külma ahju kütmisel täielikult avatud või suletud tuharestiga. Tabelist on näha, et NO_x emissioonivood olid täielikult avatud tuharestiga kütmisel kõikides faasides suuremad kui suletud tuharestiga kütmisel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine NO_x masskulu on 5,89 mg/s võrra suurem katsete 16, 18, 20 keskmisest. Põlemis- ning kustumisfaasis on täielikult avatud tuharestiga kütmisel keskmised masskulud vastavalt 2,15 mg/s ja 0,32 mg/s suuremad kui suletud tuharestiga kütmisel. Emitteeritud NO_x kogumassi korral on näha, et täielikult avatud tuharestiga kütmisel saadi süütamis- ja põlemisperioodis suuremad tulemused, aga kustumisperiodis väiksem tulemus. Põlemisperioodis tekkis täielikult avatud tuharestiga kütmisel keskmiselt 3,71 g võrra rohkem NO_x-i. Kütuse massiühiku kohta oli täielikult avatud tuharestiga kütmisel samuti emitteeritud NO_x kogus suurem. Keskmiseid koguseid võrreldes on näha, et suletud tuharestiga kütmisel oli saadud väärtus 0,40 g/kg väiksem, mis jääb määramatuse sisse.

L2.18 on kujutatud SO₂ emissioonid lepaga külma ahju kütmisel täielikult avatud või suletud tuharestiga. Tabelist on näha, et SO₂ emissioonivood olid täielikult avatud tuharestiga kütmisel süütamis- ja põlemisfaasides suuremad, aga kustumisfaasis väiksemad kui suletud tuharestiga kütmisel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine SO₂ masskulu on 0,57 mg/s võrra suurem katsete 16, 18, 20 keskmisest. Põlemis- ning kustumisfaasis saadi täielikult avatud tuharestiga kütmisel vastavalt 0,18 mg/s suurem ja 0,72 mg/s väiksem masskulu kui suletud tuharestiga kütmisel. Põlemisgaasides sisalduva SO₂ kogumasse võrreldes näeb, et täielikult avatud tuharestiga kütmisel oli tulemus süütamis- ja põlemisperioodis suurem, aga kustumisperiodis väiksem. Põlemisperioodis emiteeritud SO₂ keskmine kogus oli täielikult avatud tuharestiga kütmisel 0,47 g suurem kui suletud tuharestiga kütmisel. Kütuse massiühiku kohta oli täielikult avatud tuharestiga kütmisel tekkinud SO₂ kogus väiksem. Keskmiseid koguseid võrreldes on näha, et suletud tuharestiga kütmisel saadi 0,45 g/kg suurem tulemus. Erinevus jääb siiski määramatuse sisse ja on tingitud eelkõige ühest suuremast katsetulemusest.

L2.19 on kujutatud CO emissioonid lepaga külma ahju kütmisel täielikult avatud või suletud tuharestiga. Tabelist on näha, et CO emissioonivood olid täielikult avatud tuharestiga kütmisel kõikides faasides suuremad kui suletud tuharestiga kütmisel. Kõige väiksem oli vahe süütamisfaasis. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine CO masskulu on 5,23 mg/s võrra suurem katsete 16, 18, 20 keskmisest. Põlemis- ning kustumisfaasis on täielikult avatud tuharestiga kütmisel CO keskmised masskulud vastavalt 46 mg/s ja 8,29 mg/s võrra suuremad kui suletud tuharestiga kütmisel. Emiteeritud CO kogumassi korral on näha, et täielikult avatud tuharestiga kütmisel saadi süütamis- ja põlemisperioodis suurem, aga kustumisperiodis väiksem tulemus. Põlemisperioodis oli emiteeritud CO kogumass täielikult avatud tuharestiga kütmisel 80,92 g suurem kui suletud tuharestiga kütmisel. Kütuse massiühiku kohta oli täielikult avatud tuharestiga kütmisel emiteeritud CO kogus väiksem. Kui võrrelda keskmiseid koguseid, siis on näha, et suletud tuharestiga kütmisel saadi 24,11 g/kg suurem tulemus, mis viitab sellele, et põlemisõhu koldesse pääsemine kogu põhja ulatuses soodustas CO täielikku põlemist.

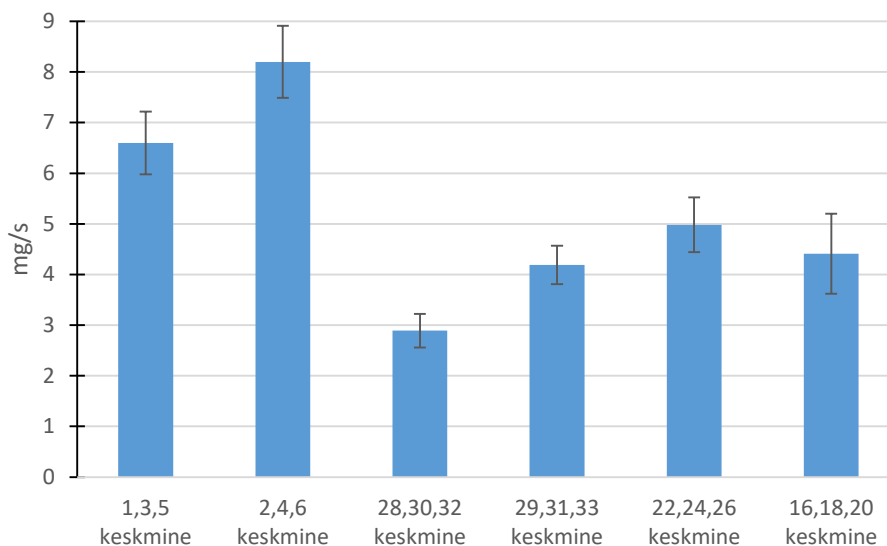
L2.20 on kujutatud TOC emissioonid lepaga külma ahju kütmisel täielikult avatud või suletud tuharestiga. Tabelist on näha, et TOC emissioonivood olid täielikult avatud tuharestiga kütmisel süütamis- ja põlemisfaasides suuremad, aga kustumisfaasis olid väiksemad kui suletud tuharestiga kütmisel. Katsete 1, 3, 5 süütamisfaasi keskmine TOC masskulu on 2,15 mg/s võrra suurem katsete 16, 18, 20 keskmisest. Põlemis- ning kustumisfaasis on täielikult avatud tuharestiga kütmisel keskmine TOC masskulu vastavalt 0,91 mg/s võrra suurem ja 2,75 mg/s võrra väiksem kui suletud tuharestiga kütmisel. Põlemisgaasides sisalduva TOC kogumasse võrreldes näeb, et täielikult avatud tuharestiga

kütmisel oli see süütamis- ja põlemisperioodis suurem, aga kustumisperioodis väiksem. Põlemisperioodis oli täielikult avatud tuharestiga kütmisel keskmine emiteeritud TOC kogus 1,48 g suurem kui suletud tuharestiga kütmisel. Kütuse massiühiku kohta saadi väiksem antud emissiooniaine kogus täielikult avatud tuharestiga kütmisel. Kui võrrelda keskmiseid koguseid, siis on näha, et suletud tuharestiga kütmisel saadud tulemus oli 1,42 g/kg suurem. See viitab sellele, et põlemisõhu koldesse pääsemine kogu põhja ulatuses soodustas TOC ühendite täielikumat põlemist.

3.6 Järeldused katsete tulemustest

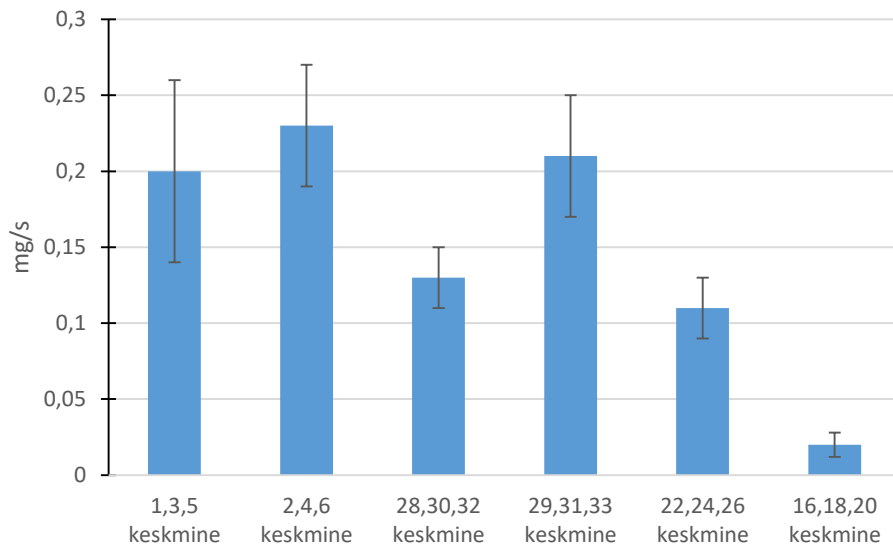
Siin peatükis vaadatakse kokkuvõtlikult üle katsete kõigi seitsme emissiooniaine kogused ja pakutakse neile põhjendusi. Võrdluseks tuuakse katsete emissioonivood erinevate katsegruppide keskmiste väärtustena koos nende mõõtemääramatustega põlemisperioodi ajal. Katsete keskmised on järgnevad: katsete 1, 3, 5 keskmine on külma ahju kütmine lepaga koos täielikult avatud õhuava ja täielikult avatud tuharestiga; katsete 2, 4, 6 keskmine on kuuma ahju kütmine lepaga; katsete 28, 30, 32 keskmine on külma ahju kütmine kuusega; katsete 29, 31, 33 keskmine on kuuma ahju kütmine kuusega; katsete 22, 24, 26 keskmine on külma ahju kütmine lepaga nii, et õhuava on pool-avatud; katsete 16, 18, 20 keskmine on külma ahju kütmine lepaga nii, et tuharest on suletud.

NO_x emissioonid kõikusid katsetel põlemisfaasis vahemikus 2,89-8,20 mg/s, kujutan neid ka Joonis 3.11. Kõige kõrgem emissioonivoog oli kuuma ahju kütmisel lepaga ja kõige madalam külma ahju kütmisel kuusega. Seda võib seletada, sellega, et lepa elementaaranalüüs näitas, et lepas on tunduvalt suurem lämmastikusisaldus kui kuuses ja kuuma ahju kütmisel lähevad temperatuurid kõrgemaks kui külma ahju kütmisel ning see suurendab võimalust termiliste NO_x heitmete tekkimiseks põlemisõhust. NO_x heitmed olid emissiooni voo ja massi mõttes kõige suuremad põlemisfaasis, süütamis- ja kustumisfaasis eraldus NO_x heitmeid vähem.



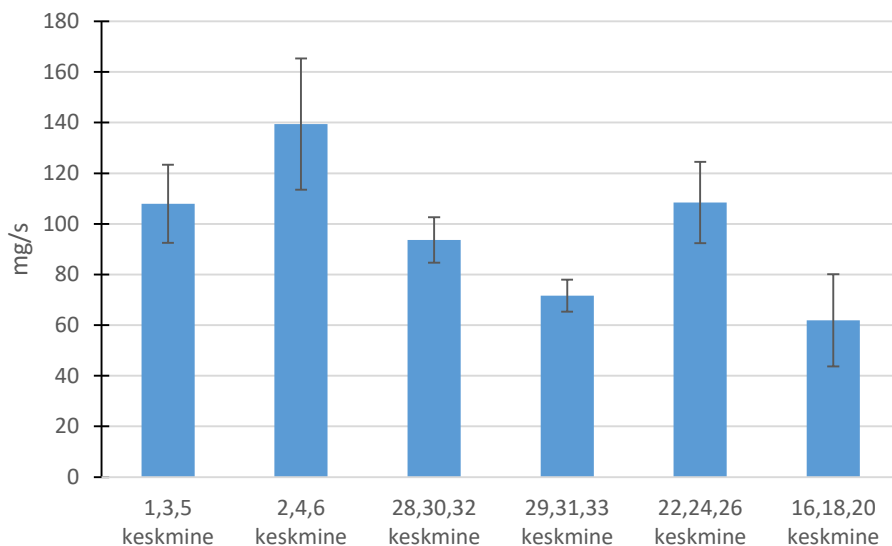
Joonis 3.11 Keskmised NO_x emissioonid põlemisfaasis

SO₂ emissioonid kõikudel katsetel põlemisfaasis vahemikus 0,02-0,23 mg/s, kujutan neid ka Joonis 3.12. Kõige kõrgem emissioonivoog oli kuuma ahju kütmisel lepaga ja teine kõrgeim oli kuuma ahju kütmisel kuusega. Siit on näha, et kõrgemad temperatuurid soodustasid SO₂ emissioonide teket. Kõige madalam oli SO₂ emissioon külma ahju kütmisel lepaga suletud tuharestiga, mis tagas, et primaar põlemisõhk pääses koldesse ühest äärest (kohast), mitte kogu kolde põhja ulatuses, üle jäänud tuli sekundaar õhuna. SO₂ emissioonivood olid kohati isegi süütamis- ja kustumisfaasis suuremad kui põlemisfaasis, kuid paralleelkatsete tulemused kõikudel seal rohkem. Massi järgi eraldus enamuse katsetes kõige rohkem SO₂ heitmeid just kustumisfaasis. SO₂ emissiooni trendide muutusi on raske põhjendada, sest elementaar analüüs näitas, et puidus on väevli sisaldus väga madal ja kuna puutuhk on aluseline, siis ta suure osa tekkivast SO₂-st seob endasse[34].



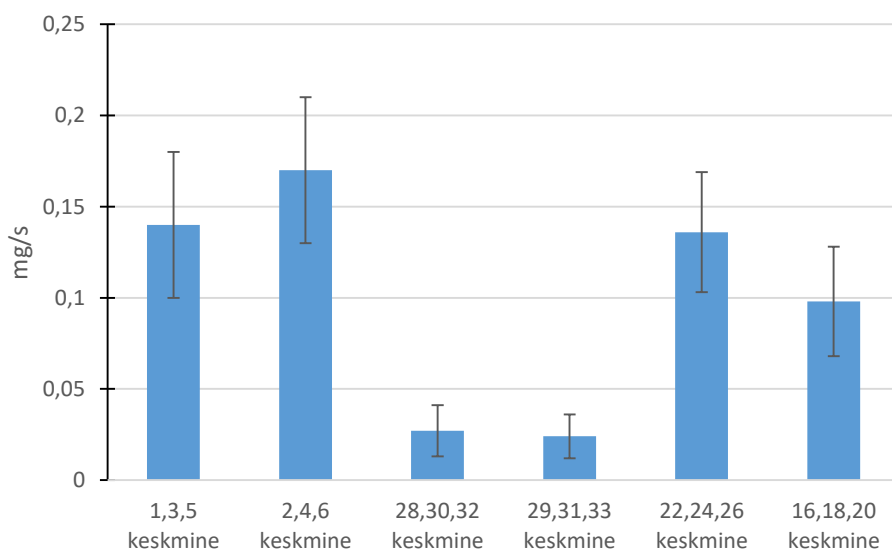
Joonis 3.12 Keskmised SO₂ emissioonid põlemisfaasis

CO emissioonid kõikusid katsetel põlemisfaasis vahemikus 61,9-139,4 mg/s, kujutan neid ka Joonis 3.13. Kõige kõrgem emissioonivoog oli kuuma ahju kütmisel lepaga. Katsetest on üleüldiselt näha, et lepaga kütmisel oli CO emissioon suurem kui kuusega kütmisel. Teine kõrgeim oli külma ahju kütmisel lepaga nii, et õhuava on pool-avatud. Siit saab järeldada, et põlemisõhu koguse vähendamine suurendas mittetäieliku põlemise osakaalu. Kõige madalam oli CO emissioon külma ahju kütmisel lepaga suletud tuharestiga, mis tagas, et primaar põlemisõhk pääses koldesse ühest äärest (kohast), mitte kogu koldepõhja ulatuses. CO emissioonivood olid süütamisfaasis madalad võrreldes teiste faasidega, aga kustumisfaasis olid vood isegi enamuse katsetes suuremad põlemisfaasi omadest. Massi järgi eraldus enamuse katsetes kustumis- ja põlemisfaasis sama palju CO emissiooni.



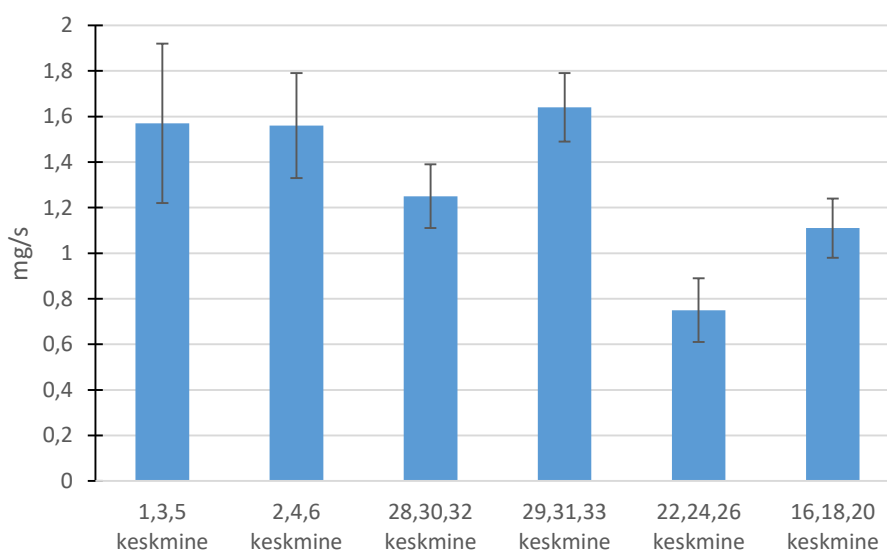
Joonis 3.13 Keskmised CO emissioonid põlemisfaasis

NH₃ emissioonid kõikudel katsetel põlemisfaasis vahemikus 0,024-0,170 mg/s, kujutan neid ka Joonis 3.14. Kõige kõrgem emissioonivoog oli kuuma ahju kütmisel lepaga ja teine kõrgeim külma ahju kütmisel lepaga. Siit saab ka järeldada, et NH₃ emissioon on seotud lepa kui kütuse suurema lämmastikusisaldusega. Graafikult on näha, et kõige madalam NH₃ emissioonivoog oli kuusega kütmisel, millel oli madalam lämmastikusisaldus elementaaranalüüsis. NH₃ emissioonivood olid süütamisfaasis madalad võrreldes teiste faasidega, aga kustumisfaasis olid need ainult natuke väiksemad kui põlemisfaasis. Massi järgi eraldus ka enim NH₃ emissiooni just põlemisfaasis.



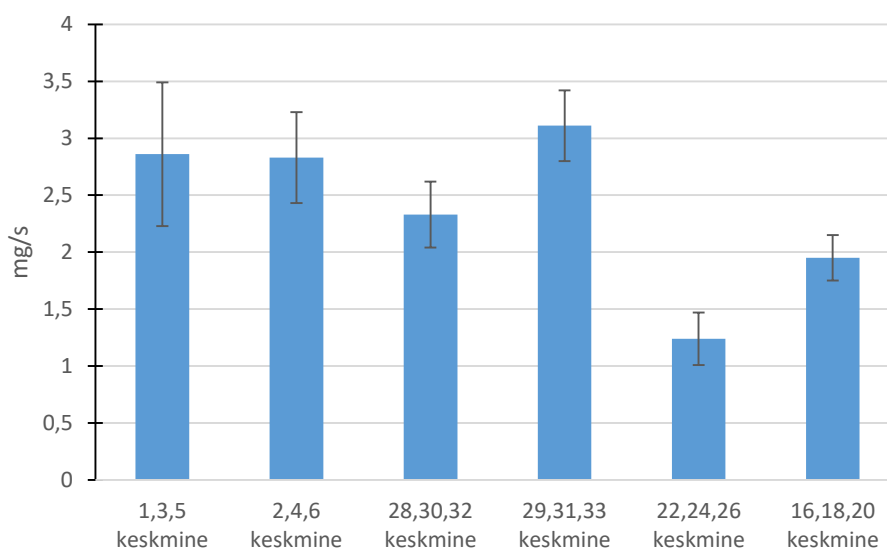
Joonis 3.14 Keskmised NH₃ emissioonid põlemisfaasis

CH₄ emissioonid kõikusid katsetel põlemisfaasis vahemikus 0,75-1,64 mg/s, kujutan neid ka Joonis 3.15. Kõige kõrgem emissioonivoog oli kuuma ahju kütmisel kuusega ja teine kõrgeim külma ahju kütmisel lepaga. Kõige madalam CH₄ emissioonivoog oli külma ahju lepaga kütmisel nii, et õhuava oli pool-avatud. Siit saab järeldada, et CH₄ heidet tekkis vähem, kui põlemisõhu voog koldesse oli väiksem ning kui tõmme koldest korstnasse oli väiksem, siis viibisid osakesed põlemistsoonis kauem ja suurem osa CH₄ jõudis täielikult põleda. CH₄ emissioonivood olid märkimisväärsed ka süütamisfaasis, aga siiski madalamad kui põlemisfaasis ja kustumisfaasis ning kõikumine katsetevahelistel väärtustel oli suur. Massi järgi eraldus ka enim CH₄ emissiooni just põlemisfaasis.



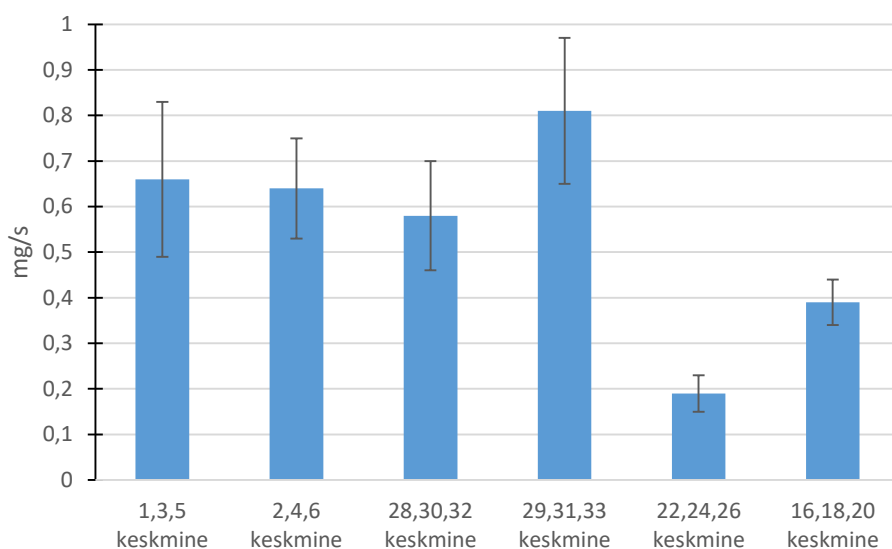
Joonis 3.15 Keskmised CH₄ emissioonid põlemisfaasis

TOC emissioonid kõikusid katsetel põlemisfaasis vahemikus 1,24-3,11 mg/s, kujutan neid ka Joonis 3.16. Sarnaselt CH₄ emissiooniga oli kõige kõrgem TOC emissioonivoog kuuma ahju kütmisel kuusega ja teine kõrgeim külma ahju kütmisel lepaga. Kõige madalam TOC emissioonivoog oli külma ahju lepaga kütmisel nii, et õhuava oli pool-avatud. Siit saab järeldada, et TOC heidet tekkis vähem, kui põlemisõhu voog koldesse oli väiksem ning kui tõmme koldest korstnasse oli väiksem, siis viibisid osakesed põlemistsoonis kauem ja suurem osa TOC ühenditest jõudis täielikult põleda. TOC emissioonivood olid märkimisväärsed ka süütamisfaasis, enamasti peaaegu sama suured või mõnedel katsetel isegi suuremad kui põlemisfaasis. Kustumis faasis jällegi madalad ja kõikumine katsetevahelistel väärtustel oli suur. Massi järgi eraldus ka enim TOC emissiooni just põlemisfaasis.



Joonis 3.16 Keskmised TOC emissioonid põlemisfaasis

LOÜ emissioonid kõikusid katsetel põlemisfaasis vahemikus 0,19-0,81 mg/s, kujutan neid ka Joonis 3.17. Sarnaselt CH₄ ja TOC emissiooniga oli kõige kõrgem LOÜ emissioonivoog kuuma ahju kütmisel kuusega ja teine kõrgeim külma ahju kütmisel lepaga. Kõige madalam LOÜ emissioonivoog oli külma ahju lepaga kütmisel nii, et õhuava oli pool-avatud. Siit saab järeldada, et LOÜ heidet tekkis vähem, kui põlemisõhu voog koldesse oli väiksem ning kui tõmme koldest korstnasse oli väiksem, siis viibisid osakesed põlemistsoonis kauem ja suurem osa LOÜ ühenditest jõudis täielikult põleda. LOÜ emissioonivood olid märkimisväärsed süütamisfaasis, kus need olid isegi enamasti kõrgemad kui põlemisfaasis ning kustumisfaasis natuke madalamad kui põlemisfaasis, kuid kõikumine katsetevahelistel väärtustel oli suur. Massi järgi eraldus ka enim LOÜ emissiooni ikkagi põlemisfaasis.



Joonis 3.17 Keskmised LOÜ emissioonid põlemisfaasis

Lõpetuseks toon välja Soome Sotsiaal- ja tervisetoodete kontrolli (STTV) andmetel [35] keskmised CO ja LOÜ emissioonid ahju kütmisel ja võrdlen neid Tabel 3.15 antud töö raames tehtud katsete tulemustega. Antud töö katsetes on kuuse alumine kütteväärtus 18,82 MJ/kg ja lepa oma 18,81 MJ/kg. Tabelist on näha, et antud töö raames tehtud katsetes oli kõigis arvestatavalt suurem CO emissioon võrreldes STTV andmetega. Samas aga LOÜ emissioon on kõigis katsetes oluliselt madalam võrreldes STTV keskmise väärtusega[35].

Tabel 3.15 Katsete CO ja LOÜ heitmekoguste energiaühiku kohta võrdlus STTV tulemustega

	Külm ahi		Kuum ahi		Õhuava pool-lahti	Tuharest kinni	STTV andmed
	Lepp	Kuusk	Lepp	Kuusk	Lepp	Lepp	
Keskmine kütuse mass, kg	5,33	5,71	5,92	6,25	5,41	5,30	
Keskmine energia, MJ	100,26	107,46	111,36	117,63	101,76	99,69	
Keskmine emissioon, CO, g	533,67	482,71	665,75	533,67	484,60	674,33	
Keskmine emissioon LOÜ, g	4,04	3,84	3,86	3,89	1,95	7,82	
CO, g/MJ	5,32	4,49	5,98	4,54	4,76	6,76	3,10
LOÜ, g/MJ	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,08	0,59

KOKKUVÕTE

Biomassi on kasutatud kütteks ja energia tootmiseks juba pikka aega ning tänapäeval on selle osakaal veelgi kasvamas, et asendada fossiilkütuseid. Fossiilkütuseid asendatakse eelkõige puitu, puidujäätmeid ja muud biomassi kütusena kasutavate kateldegaga, mida kasutatakse nii elektri või soojuse, kui ka koostootmisel. Selles olustikus on tähtsal kohal ka ühepereelamute ahjud, kaasaarvatud Eestis. Ahi või kamin pakub kodule rohelist küttelehendust ja varustuskindlust võrreldes välismaiste kütuste ja elektrilise küttelehendusega. Viimasel ajal aga on aina rohkem hakatud tähelepanu pöörama biokütuse kasutamisel tekkivatele õhuemissioonidele ja sellele, kuidas neid vähendada. Seda nii suure, keskmise kui ka väikese võimsusega põletusseadmete juures. Uuemate ahjude ja kaminatootjad annavad oma toodetele heitmete piirväärtused, mis on saadud laboratoorsetel katsetel. Need piirväärtused on aga arvestatavalt madalamad võrreldes reaalses oludes sooritatud katsetega, mis imiteerivad rohkem igapäevaelu olukordi.

Uurimistöö eesmärk on uurida tekkivaid emissioone kodusel ahjukütisel ja kui suurel määral seda mõjutab kasutatav kütmise meetoodika ning puitkütuse valik. Selleks teostati energiatehnoloogia instituudis paiknevas ahjus (Tulikivi TU 1000/50) põletuskatseid, mis iseloomustasid tavapärasest ahjukütmist kodus. Katsetes mõõdeti suitsugaaside koostist reaalses kogu katsejooksul kasutades FT-IR seadet ning mõõdeti termopaariga põlemisgaaside temperatuuri. Saadud temperatuurimuutuse graafiku alusel jagati katsed kolmeks perioodiks: süütamis-, põlemis- ja söestumis-/kustumisperiood. Katseid teostati kahe puuliigiga halllepa ja kuusega ning emissiooniandmeid koguti seitsme ühendi kohta: NO_x, SO₂, CO, NH₃, CH₄, TOC, LOÜ. Katsetes varieeriti mitmeid tingimusi, nagu näiteks: külma ja kuuma ahju kütmine, õhuavaga põlemisõhu hulga reguleerimine, tuharestiga põlemisõhu koldesse liikumistee reguleerimine, kütuse vahetus, kütuse lisamine kütmise ajal ja süütamine erinevete süütevahenditega nagu süütabletid, ajalehed ja vanapaber.

Tulemused olid kõige paremini võrreldavad põlemisfaasis, sest enamus süütamis- ja kustumisfaasi tulemused kõikusid ja nende mõõtemääramatus oli suurem. NO_x emissioonid kõikusid katsetel põlemisfaasis vahemikus 2,89-8,20 mg/s. Kõige kõrgem emissioonivoog oli kuuma ahju kütisel lepaga ja kõige madalam külma ahju kütisel kuusega. Seda võib seletada asjaoluga, et lepa puit sisaldab oluliselt rohkem lämmastikku võrreldes kuusega. SO₂ emissioonid kõikusid katsetel põlemisfaasis vahemikus 0,02-0,23 mg/s. Kõige kõrgem emissioonivoog oli kuuma ahju kütisel lepaga ja teine kõrgeim oli kuuma ahju kütmine kuusega. Siit on näha, et kõrgemad temperatuurid soodustasid SO₂ emissioonide teket. Kõige madalam oli SO₂ emissioon külma ahju kütisel lepaga suletud tuharestiga, mis tagas, et põlemisõhk pääses koldesse primaarõhuna ühest kohast, mitte kogu koldepõhja ulatuses. Ülejäänud õhk tuli sekundaarõhuna koldes olevate keraamiliste plaatide vahelt. Tuleb tõdeda, et SO₂ heitmete tulemuste trendi on keeruline iseloomustada ja põhjendada,

sest mõõtemääramatus oli suur ja on teada, et väevli sisaldus kütuses oli madal ja aluseline puutuhk sidus ka endasse suure osa SO_2 -st. CO emissioonid kõikusid katsetel põlemisfaasis vahemikus 61,9-139,4 mg/s. Kõige kõrgem emissioonivoog oli kuuma ahju kütmisel lepaga, katsetest on üleüldiselt näha, et lepaga kütmisel oli CO emissioon suurem kui kuusega kütmisel. Teine kõrgeim oli külma ahju kütmine lepaga nii, et õhuava on pool-avatud. Siit saab järeldada, et põlemisõhu koguse vähendamine suurendas mittetäieliku põlemise osakaalu. Kõige madalam oli CO emissioon külma ahju kütmisel lepaga, täielikult avatud põlemisõhu avaga ja suletud tuharestiga, mis tagas, et primaarne põlemisõhk pääses osaliselt koldesse ühest äärest (kohast), mitte kogu koldepõhja ulatuses ja ülejäänud põlemisõhk tuli koldesse keraamiliste plaatide vahel asuvast pilust sekundaarõhuna ja põletas CO-d täielikumalt. NH_3 emissioonid kõikusid katsetel põlemisfaasis vahemikus 0,024-0,170 mg/s. Kõige kõrgem emissioonivoog oli kuuma ahju kütmisel lepaga ja teine kõrgeim külma ahju kütmisel lepaga. Siit saab ka järeldada, et NH_3 emissioon on seotud lepa kui kütuse suurema lämmastikusisaldusega. CH_4 , TOC ja LOÜ emissioonid kõikusid katsetel põlemisfaasis vahemikus vastavalt 0,75-1,64 mg/s, 1,24-3,11 mg/s, 0,19-0,81 mg/s. LOÜ, CH_4 ja TOC emissioonid käitusid sarnaselt, kõige kõrgemad olid emissioonivood kuuma ahju kütmisel kuusega ja teine kõrgeim külma ahju kütmisel lepaga. Kõige madalamad olid emissioonivood külma ahju lepaga kütmisel nii, et õhuava oli pool-avatud. Siit saab järeldada, et LOÜ, CH_4 ja TOC heidet tekkis vähem, kui põlemisõhu voog koldesse oli väiksem ning kui tõmme koldest korstnasse oli väiksem, siis viibisid osakesed põlemistsoonis kauem ja suurem osa LOÜ, CH_4 ja TOC ühenditest jõudis täielikult põleda.

SUMMARY

Biomass has long been used for heating and energy production, and today its share is growing to replace fossil fuels. Fossil fuels are being replaced, in particular, by boilers using wood, wood waste and other biomass fuels, both for electricity and heat and for cogeneration. Furnaces of single-family houses, including in Estonia, are also important in this situation. A furnace or fireplace offers a green heating solution and security of supply for a home compared to foreign fuels and electric heating. Recently, however, more and more attention has been paid to air emissions from the use of biofuels and how to reduce them. This is the case for high, medium and low power incinerators. Manufacturers of newer stoves and fireplaces provide their products with emission limit values obtained from laboratory tests. However, these limits are significantly lower than real-world experiments, which more closely mimic everyday situations.

The aim of the research is to study the emissions from home furnace heating and the extent to which this is influenced by the heating methodology used and the choice of wood fuel. For this purpose, combustion tests were performed in the furnace located at the Institute of Energy Technology (Tulikivi TU 1000/50), which characterized the usual furnace heating at home. In the experiments, the composition of the flue gases was measured in real time throughout the test using an FT-IR device and the temperature of the combustion gases with a thermocouple was measured. Based on the resulting temperature change graph, the experiments were divided into three periods: ignition, combustion, and charring / extinguishing. The experiments were performed with two tree species gray oaks and spruce, and emission data were collected for seven compounds: NO_x, SO₂, CO, NH₃, CH₄, TOC, VOC. The experiments varied several conditions, such as: heating the hot and cold furnace, adjusting the amount of combustion air in the air vent, adjusting the path of the combustion air to the furnace with grate, changing the fuel, adding fuel during heating and igniting with various ignition devices such as tablets, newspapers and waste paper.

The results were best compared in the combustion phase, as most of the results in the ignition and extinction phases fluctuated and had a higher measurement uncertainty. NO_x emissions in the combustion phase ranged from 2,89 to 8,20 mg/s during the experiments. The highest emission flow was for hot furnace heating with alder and the lowest for cold furnace heating with spruce. This can be explained by the fact that alder wood contains significantly more nitrogen than spruce. SO₂ emissions in the experiments during the combustion phase ranged from 0,02 to 0,23 mg/s. The highest emission flow was for heating the hot furnace with alder and the second highest was for heating the hot furnace with spruce. It can be seen from this that higher temperatures contributed to SO₂ emissions. The lowest SO₂ emissions were from the heating of the cold furnace with an

alder and a sealed ash grate, which ensured that the combustion air entered the hearth as primary air from one place and not the entire bottom of the hearth. The rest of the air came as secondary air between the ceramic tiles in the hearth. It should be noted that the trend in SO₂ emission results is difficult to characterize and justify due to the high measurement uncertainty. CO emissions in the experiments during the combustion phase ranged from 61,9 to 139,4 mg/s. The highest emission flow was in the heating of the hot furnace with alder, the experiments show that the CO emissions were higher in the heating of alder than in the heating of spruce. The second highest was the heating of the cold furnace with alder so that the air vent is half-open. From this it can be concluded that reducing the amount of combustion air increased the proportion of incomplete combustion. The lowest CO emissions were from heating the furnace with alder, a fully open combustion air vent and a closed ash grate, which ensured that the primary combustion air partially came from one edge (side of ash grate) and not the entire bottom of hearth and the rest of the combustion air came from between the ceramic tiles as a secondary air and burned CO more thoroughly. NH₃ emissions fluctuated between 0,024 and 0,170 mg/s during the combustion phase. The highest emission flow was for heating a hot furnace with alder and the second highest for heating a cold furnace with alder. It can also be concluded that NH₃ emissions are related to the higher nitrogen content of alder as a fuel. CH₄, TOC and VOC emissions in the combustion phase ranged from 0,75-1,64 mg/s, 1,24-3,11 mg/s, 0,19-0,81 mg/s, respectively. VOC, CH₄ and TOC emissions behaved similarly, with the highest emission flows for hot furnace heating with spruce and the second highest for cold furnace heating with alder. Emission flows were lowest when heating the cold furnace with alder so that the air vent was half-open. From this it can be concluded that VOC, CH₄ and TOC emissions were lower when the combustion air flow to the furnace was lower and when the draft from the furnace to the chimney was lower, the particles stayed longer in the combustion zone and most of the VOC, CH₄ and TOC compounds burned completely.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] E. Maaülikool, „Energiakasutuse ja bioenergia osakaalu muutused investeringutoetuse saajate näitel“, 2015.
- [2] OÜ ja Kaulprojekt, „Miks kasutada fossiilkütuste asemel biomassi?“, *Kaulprojekt*. [Online]. Available at: <https://kaul.ee/biomassi-kasutamine/>.
- [3] J. Oidermaa, „Puidu ahju ajamine päästab poliitikud, kuid mitte kliima“, *Novaator*, 2019. [Online]. Available at: <https://novaator.err.ee/976954/puidu-ahju-ajamine-paastab-poliitikud-kuid-mitte-kliima>.
- [4] EU(Science hub), „Facts and figures on bioenergy in the EU“, *The European Commission's science and knowledge service*, 2021. [Online]. Available at: <https://ec.europa.eu/jrc/en/science-update/facts-and-figures-bioenergy-eu>.
- [5] T. Pott, „Eesti soovib koos naabritega ka edaspidi biomassist energiat toota“, *Novaator*, 2021. [Online]. Available at: <https://www.err.ee/1608279258/eesti-soovib-koos-naabritega-ka-edaspidi-biomassist-energiat-toota>.
- [6] R. Scharler *et al.*, „Transient CFD simulation of wood log combustion in stoves“, *Renew. Energy*, kd 145, lk 651–662, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.06.053.
- [7] Y. Olsen *et al.*, „Emissions and source allocation of carbonaceous air pollutants from wood stoves in developed countries: A review“, *Atmos. Pollut. Res.*, kd 11, nr 2, lk 234–251, 2020, doi: 10.1016/j.apr.2019.10.007.
- [8] J. Guillot, „Biomass- millised on võimalused Eestis?“
- [9] S. Zafar, „Summary of Biomass Combustion Technologies“, *BioEnergyConsult*, 2021.
- [10] V. Vares, Ü. Kask, P. Muiste, T. Pihu, ja S. Soosaar, *Manual for Biofuel Users*. 2005.
- [11] M. A. Bari, G. Baumbach, B. Kuch, ja G. Scheffknecht, „Wood smoke as a source of particle-phase organic compounds in residential areas“, *Atmos. Environ.*, kd 43, nr 31, lk 4722–4732, 2009, doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.006.
- [12] D. Wang *et al.*, „Significant ultrafine particle emissions from residential solid fuel combustion“, *Sci. Total Environ.*, kd 715, lk 1–7, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136992.
- [13] W. Du *et al.*, „PAHs emissions from residential biomass burning in real-world cooking stoves in rural China“, *Environ. Pollut.*, kd 267, lk 115592, 2020, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115592.

- [14] J. Poláček, T. Sitek, J. Pospíšil, L. Šnajdárek, ja M. Lisý, „Emission of fine particles from residential combustion of wood: Comparison of automatic boiler, manual log feed stove and thermo-gravimetric analysis“, *J. Clean. Prod.*, kd 279, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123664.
- [15] F. Guerrero, A. Arriagada, F. Muñoz, P. Silva, N. Ripoll, ja M. Toledo, „Particulate matter emissions reduction from residential wood stove using inert porous material inside its combustion chamber“, *Fuel*, kd 289, nr August 2020, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119756.
- [16] J. Liu *et al.*, „Air pollutant emissions from Chinese households: A major and underappreciated ambient pollution source“, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, kd 113, nr 28, lk 7756–7761, 2016, doi: 10.1073/pnas.1604537113.
- [17] L. Iswar, C and Devy, „Encyclopedia of Environmental Health“, *Encyclopedia of Environmental Health*. 2019.
- [18] „CO2 Emissions“, 2018. [Online]. Available at: <https://www.worldometers.info/co2-emissions/>.
- [19] E. Boechler, „Carbon monoxide“, *ENERGY EDUCATION*, 2021. [Online]. Available at: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Carbon_monoxide.
- [20] NOX(FOND), „What is NOx?“, *NOX-fondet*, 2008. [Online]. Available at: <https://www.noxfondet.no/en/articles/what-is-nox/>.
- [21] „Sulfur dioxide (SO2)“, *Minnesota pollution control agency*. [Online]. Available at: <https://www.pca.state.mn.us/air/sulfur-dioxide-so2#:~:text=These gases%2C especially SO2%2C are,and smelting facilities%2C and vehicles.&text=Sulfur dioxide is also a natural byproduct of volcanic activity>.
- [22] M. Adams, „INDICATOR SPECIFICATION Ammonia (NH3) emissions“, *European Environment Agency (EEA)*, 2015. [Online]. Available at: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/eea-32-ammonia-nh3-emissions-1>.
- [23] „Global Methane budget 2008-2017“, *Global Carbon Atlas*, 2018. [Online]. Available at: <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CH4-emissions>.
- [24] T. Stocker, „Overview of Greenhouse Gases“, *United States Environmental Protection agency*, 2020. [Online]. Available at: [https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#:~:text=Methane \(CH4\)%3A Methane,in municipal solid waste landfills](https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#:~:text=Methane (CH4)%3A Methane,in municipal solid waste landfills).

- [25] „Understanding the Importance of TOC in Environmental Science“, *Environtech*, 2019.
- [26] „How VOCs affect air quality, health and the environment – Part 1“, *Crowcon*, 2021. [Online]. Available at: <https://www.crowcon.com/blog/how-vocs-affect-air-quality-health-and-the-environment/>.
- [27] H. Shen *et al.*, „A critical review of pollutant emission factors from fuel combustion in home stoves“, *Environ. Int.*, kd 157, lk 106841, 2021, doi: 10.1016/j.envint.2021.106841.
- [28] Z. Padilla-Barrera *et al.*, „Determination of emission factors for climate forcers and air pollutants from improved wood-burning cookstoves in Mexico“, *Energy Sustain. Dev.*, kd 50, lk 61–68, 2019, doi: 10.1016/j.esd.2019.02.004.
- [29] M. F. Heringa *et al.*, „Investigations of primary and secondary particulate matter of different wood combustion appliances with a high-resolution time-of-flight aerosol mass spectrometer“, *Atmos. Chem. Phys.*, kd 11, nr 12, lk 5945–5957, 2011, doi: 10.5194/acp-11-5945-2011.
- [30] C. Liu, C. Zhang, Y. Mu, J. Liu, ja Y. Zhang, „Emission of volatile organic compounds from domestic coal stove with the actual alternation of flaming and smoldering combustion processes“, *Environ. Pollut.*, kd 221, lk 385–391, 2017, doi: 10.1016/j.envpol.2016.11.089.
- [31] G. Reichert ja C. Schmidl, „Advanced Test Methods for Firewood Stoves“, 2018.
- [32] M. König, I. Hartmann, F. Varas-Concha, C. Torres-Fuchslocher, ja F. Hoferecht, „Effects of single and combined retrofit devices on the performance of wood stoves“, *Renew. Energy*, kd 171, lk 75–84, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.02.050.
- [33] „Tulikivi tooted“, *Tulikivi.ee*, 2021. [Online]. Available at: https://www.tulikivi.com/ee/Tooted/TU1000_50.
- [34] H. S. Oglesby ja R. O. Blosser, „Information on the Sulfur Content of Bark and its Contribution to SO₂ Emissions when Burned as a Fuel Information on the Sulfur Content of Bark and its Contribution to SO₂ Emissions when Burned as a Fuel“, kd 2470, 2012, doi: 10.1080/00022470.1980.10465107.
- [35] STTV, „Puun pienpolttoja koskevat terveystalliset ohjeet“, 2008.

Lisa 1 Alapeatükis 3.4 kirjeldatud katsete tulemused

L1.1 NO_x heitmed lepaga külma ahju kütmisel avatud ja pool-avatud põlemisõhu avaga

Katse	Külma ahju kütmine lepaga, põlemis õhu ava avatud				Külma ahju kütmine lepaga, põlemisõhu ava pool-avatud			
	1	3	5	Keskmine	22	24	26	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	12,8	9,91	5,04	9,25±2,41	2,16	3,55	4,42	3,38±0,72
Põlemisfaas	6,03	6,69	6,97	6,56±0,62	4,41	5,61	4,91	4,98±0,54
Kustumisfaas	6,17	3,96	3,02	4,38±1,01	1,53	8,83	2,66	4,34±2,30
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	7,68	5,35	3,93	-	0,65	1,28	1,33	-
Põlemisfaas	14,84	16,06	19,24	16,71±1,9 2	14,0 3	15,81	14,73	14,86±1,35
Kustumisfaas	7,03	7,85	5,43	-	2,66	13,24	4,32	-
Summaarne emissioon, g	29,56	29,26	28,6	29,14	17,3 4	30,33	20,37	22,68
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	5,55	5,51	5,16	5,41
Eriemissioon, g/kg	5,84	5,36	5,23	5,48±0,49	3,12	5,5	3,95	4,19±0,78

L1.2 SO₂ heitmed lepaga külma ahju kütmisel avatud ja pool-avatud põlemisõhu avaga

Katse	Külma ahju kütmine lepaga, põlemis õhu ava avatud				Külma ahju kütmine lepaga, põlemisõhu ava pool-avatud			
	1	3	5	Keskmine	22	24	26	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	1,09	0,92	0,26	0,76±0,28	0,34	0,26	0,32	0,31±0,05
Põlemisfaas	0,2	0,11	0,3	0,20±0,06	0,1	0,09	0,15	0,11±0,02
Kustumisfaas	1,37	0,18	0,36	0,64±0,38	0,41	2,23	0,4	1,01±0,62
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	0,66	0,49	0,2	-	0,1	0,09	0,1	-
Põlemisfaas	0,49	0,26	0,83	0,53±0,18	0,32	0,26	0,45	0,34±0,07
Kustumisfaas	1,56	0,36	0,66	-	0,72	3,34	0,65	-
Summaarne emissioon, g	2,7	1,12	1,68	1,84	1,14	3,69	1,2	2,01
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	5,55	5,51	5,16	5,41
Eriemissioon, g/kg	0,53	0,21	0,31	0,35±0,11	0,21	0,67	0,37	0,37±0,16

L1.3 CO heitmed lepaga külma ahju kütmisel avatud ja pool-avatud põlemisõhu avaga

Katse	Külma ahju kütmine lepaga, põlemis õhu ava avatud				Külma ahju kütmine lepaga, põlemisõhu ava pool-avatud			
	1	3	5	Keskmine	22	24	26	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	27,03	22,0 4	18,5 2	22,53±3,0 7	18,18	20,22	16,12	18,17±1,9 0
Põlemisfaas	124,4 9	83,0 3	116, 19	107,90±15 ,43	83,3	128,8 1	113,1 9	108,43±16 ,02
Kustumisfaas	147,6 6	147, 37	151, 16	148,73±12 ,19	82,8	113,1 7	95,48	97,15±11, 85
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	16,22	11,9	14,4 5	-	5,45	7,28	4,84	-
Põlemisfaas	306,2 3	199, 28	320, 69	275,40±44 ,39	264,89	363,2 4	339,5 6	322,57±39 ,64
Kustumisfaas	168,3 3	291, 8	272, 1	-	144,07	169,7 6	154,6 8	-
Summaarne emissioon, g	490,7 9	502, 98	607, 23	533,67	414,42	540,2 8	499,0 8	484,6
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	5,55	5,51	5,16	5,41
Eriemissioon, g/kg	96,99	92,1 2	111, 01	100,04±9, 93	74,67	98,06	89,82	89,82±10, 54

L1.4 NH₃ heitmed lepaga külma ahju kütmisel avatud ja pool-avatud põlemisõhu avaga

Katse	Külma ahju kütmine lepaga, põlemis õhu ava avatud				Külma ahju kütmine lepaga, põlemisõhu ava pool-avatud			
	1	3	5	Keskmine	22	24	26	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	0	0,1	0	0,03±0,02	0	0,02	0	0,01±0,005
Põlemisfaas	0,1	0,1 2	0,2	0,14±0,04	0,11	0,12	0,18	0,14±0,03
Kustumisfaas	0,24	0,3 9	0,1 8	0,27±0,08	0,11	0,05	0,15	0,10±0,03
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	0	0,0 5	0	-	0	0,01	0	-
Põlemisfaas	0,25	0,3	0,5 7	0,37±0,12	0,36	0,33	0,53	0,41±0,10
Kustumisfaas	0,27	0,7 6	0,3 2	-	0,19	0,08	0,24	-
Summaarne emissioon, g	0,52	1,1 1	0,8 9	0,84	0,55	0,42	0,77	0,58
Kütuse mass, kg	5,06	5,4 6	5,4 7	5,33	5,55	5,51	5,16	5,41
Eriemissioon, g/kg	0,1	0,2	0,1 6	0,16±0,04	0,1	0,08	0,15	0,11±0,03

L1.5 CH₄ heitmed lepaga külma ahju kütisel avatud ja pool-avatud põlemisõhu avaga

Katse	Külma ahju kütmine lepaga, põlemis õhu ava avatud				Külma ahju kütmine lepaga, põlemisõhu ava pool-avatud			
	1	3	5	Keskmine	22	24	26	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	1,12	1,33	0,81	1,09±0,18	0,61	0,41	0,51	0,51±0,07
Põlemisfaas	0,99	1,66	2,07	1,57±0,35	0,61	0,65	0,98	0,75±0,14
Kustumisfaas	0,43	1,1	0,29	0,61±0,26	0,28	0,85	0,14	0,42±0,22
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	0,67	0,72	0,63	-	0,18	0,15	0,15	-
Põlemisfaas	2,43	3,99	5,71	4,04±1,02	1,93	1,82	2,95	2,23±0,42
Kustumisfaas	0,49	2,17	0,53	-	0,5	1,28	0,22	-
Summaarne emissioon, g	3,59	6,88	6,86	5,78	2,61	3,25	3,32	3,06
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	5,55	5,51	5,16	5,41
Eriemissioon, g/kg	0,71	1,26	1,25	1,07±0,21	0,47	0,59	0,64	0,57±0,07

L1.6 TOC heitmed lepaga külma ahju kütisel avatud ja pool-avatud põlemisõhu avaga

Katse	Külma ahju kütmine lepaga, põlemis õhu ava avatud				Külma ahju kütmine lepaga, põlemisõhu ava pool-avatud			
	1	3	5	Keskmine	22	24	26	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	4,22	4,93	1,94	3,70±0,96	1,51	1,18	1,6 ₃	1,44±0,18
Põlemisfaas	1,75	3,08	3,73	2,86±0,63	1,01	1,07	1,6 ₂	1,24±0,23
Kustumisfaas	1,42	2,3	0,84	1,52±0,44	0,51	2,67	0,8 ₂	1,34±0,69
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	2,53	2,66	1,52	-	0,45	0,42	0,4 ₉	-
Põlemisfaas	4,31	7,4	10,3	7,34±1,84	3,21	3,03	4,8 ₈	3,71±0,67
Kustumisfaas	1,62	4,55	1,52	-	0,9	4,01	1,3 ₂	-
Summaarne emissioon, g	8,47	14,6 ₁	13,3 ₄	12,14	4,56	7,47	6,7	6,24
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	5,55	5,51	5,1 ₆	5,41
Eriemissioon, g/kg	1,67	2,68	2,44	2,26±0,36	0,82	1,35	1,3	1,16±0,20

L1.7 LOÜ heitmed lepaga külma ahju kütmisel avatud ja pool-avatud põlemisõhu avaga

Katse	Külma ahju kütmine lepaga, põlemis õhu ava avatud				Külma ahju kütmine lepaga, põlemisõhu ava pool-avatud			
	1	3	5	Keskmine	22	24	26	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	2,64	3,05	0,81	2,17±0,74	0,65	0,6	0,92	0,73±0,13
Põlemisfaas	0,37	0,76	0,84	0,66±0,17	0,16	0,17	0,25	0,19±0,04
Kustumisfaas	0,81	0,76	0,44	0,67±0,14	0,11	1,47	0,62	0,74±0,41
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	1,58	1,65	0,63	-	0,2	0,22	0,28	-
Põlemisfaas	0,92	1,82	2,32	1,69±0,46	0,5	0,48	0,75	0,58±0,11
Kustumisfaas	0,93	1,5	0,78	-	0,2	2,21	1,01	-
Summaarne emissioon, g	3,42	4,97	3,73	4,04	0,9	2,91	2,04	1,95
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	5,55	5,51	5,16	5,41
Eriemissioon, g/kg	0,68	0,91	0,68	0,76±0,12	0,16	0,53	0,4	0,36±0,12

Lisa 2 Alapeatükis 3.5 kirjeldatud katsete tulemused

L2.1 NO_x heitmed süütekatsel süütableti või vana ajalehega

	Süütekate süütabletiga				Süütekate vana ajalehega			
Katse	7	8	9	Keskmine	10	11	12	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	4,65	6	6,37	5,67±0,71	5,96	4,3	2,99	4,42±0,94
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	3,35	3,96	4,97	4,09±0,58	2,15	1,03	1,08	1,42±0,38
Kütuse mass, kg	5,03	5,54	5,44	5,34	5,23	5,34	5,26	5,28

L2.2 CH₄ heitmed süütekatsel süütableti või vana ajalehega

	Süütekate süütabletiga				Süütekate vana ajalehega			
Katse	7	8	9	Keskmine	10	11	12	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	0,55	1,26	0,75	0,85±0,22	1,08	0,62	0,29	0,66±0,24
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	0,39	0,83	0,58	0,60±0,14	0,39	0,15	0,1	0,21±0,09
Kütuse mass, kg	5,03	5,54	5,44	5,34	5,23	5,34	5,26	5,28

L2.3 TOC heitmed süütekatsel süütableti või vana ajalehega

	Süütekate süütabletiga				Süütekate vana ajalehega			
Katse	7	8	9	Keskmine	10	11	12	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	1,69	4,21	2,24	2,71±0,80	2,82	1,9	0,67	1,79±0,64
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	1,21	2,78	1,75	1,91±0,49	1,01	0,45	0,24	0,57±0,24
Kütuse mass, kg	5,03	5,54	5,44	5,34	5,23	5,34	5,26	5,28

L2.4 LOÜ heitmed süütekatsel süütableti või vana ajalehega

	Süütekate süütabletiga				Süütekate vana ajalehega			
Katse	7	8	9	Keskmine	10	11	12	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	0,92	2,44	1,19	1,52±0,50	1,31	1,03	0,26	0,87±0,33
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	0,66	1,61	0,93	1,07±0,31	0,47	0,25	0,1	0,27±0,11
Kütuse mass, kg	5,03	5,54	5,44	5,34	5,23	5,34	5,26	5,28

L2.5 SO₂ heitmed lepakütisel põlemisfaasi lõpus kahe halu või nelja halu lisamisega

Katse	Külma ahju kütmine lepaga, põlemis faasi lõpus kahe halu lisamine				Külma ahju kütmine lepaga, põlemisfaasi lõpus nelja halu lisamine			
	7	8	9	Keskmine	10	11	12	Keskmine
Summaarne emissioon, g	0,71	1,43	2,76	1,63	1,97	1,69	7,52	3,73
Algne kütuse mass, kg	5,03	5,54	5,44	5,34	5,23	5,34	5,26	5,28
Lisatud kütuse mass, kg	1	0,75	1,36	1,04	3	2,77	2,16	2,64
Kütuse mass, kg	6,03	6,29	6,8	6,38	8,23	8,11	7,42	7,92
Eriemissioon, g/kg	0,12	0,23	0,41	0,25±0,09	0,24	0,21	1,01	0,49±0,27

L2.6 CO heitmed lepakütisel põlemisfaasi lõpus kahe halu või nelja halu lisamisega

Katse	Külma ahju kütmine lepaga, põlemis faasi lõpus kahe halu lisamine				Külma ahju kütmine lepaga, põlemisfaasi lõpus nelja halu lisamine			
	7	8	9	Keskmine	10	11	12	Keskmine
Summaarne emissioon, g	599,32	585,59	795,29	660,07	965,54	966,94	624,8	852,43
Algne kütuse mass, kg	5,03	5,54	5,44	5,34	5,23	5,34	5,26	5,28
Lisatud kütuse mass, kg	1	0,75	1,36	1,04	3	2,77	2,16	2,64
Kütuse mass, kg	6,03	6,29	6,8	6,38	8,23	8,11	7,42	7,92
Eriemissioon, g/kg	99,39	93,1	116,95	103,15±11,04	117,32	119,23	84,2	106,92±14,34

L2.7 NH₃ heitmed lepakütisel põlemisfaasi lõpus kahe halu või nelja halu lisamisega

Katse	Külma ahju kütmine lepaga, põlemis faasi lõpus kahe halu lisamine				Külma ahju kütmine lepaga, põlemisfaasi lõpus nelja halu lisamine			
	7	8	9	Keskmine	10	11	12	Keskmine
Summaarne emissioon, g	1,06	1	1,64	1,23	0,88	0,76	0,65	0,76
Algne kütuse mass, kg	5,03	5,54	5,44	5,34	5,23	5,34	5,26	5,28
Lisatud kütuse mass, kg	1	0,75	1,36	1,04	3	2,77	2,16	2,64
Kütuse mass, kg	6,03	6,29	6,8	6,38	8,23	8,11	7,42	7,92
Eriemissioon, g/kg	0,18	0,16	0,24	0,19±0,05	0,11	0,09	0,09	0,10±0,02

L2.8 CH₄ heitmed lepakütmisel põlemisfaasi lõpus kahe halu või nelja halu lisamisega

Katse	Külma ahju kütmine lepaga, põlemis faasi lõpus kahe halu lisamine				Külma ahju kütmine lepaga, põlemisfaasi lõpus nelja halu lisamine			
	7	8	9	Keskmine	10	11	12	Keskmine
Summaarne emissioon, g	8,53	9,41	12,18	10,04	9,72	5,95	7,84	7,84
Algne kütuse mass, kg	5,03	5,54	5,44	5,34	5,23	5,34	5,26	5,28
Lisatud kütuse mass, kg	1	0,75	1,36	1,04	3	2,77	2,16	2,64
Kütuse mass, kg	6,03	6,29	6,8	6,38	8,23	8,11	7,42	7,92
Eriemissioon, g/kg	1,42	1,5	1,79	1,57±0,19	1,18	0,73	1,06	0,99±0,16

L2.9 TOC heitmed lepakütmisel põlemisfaasi lõpus kahe halu või nelja halu lisamisega

Katse	Külma ahju kütmine lepaga, põlemis faasi lõpus kahe halu lisamine				Külma ahju kütmine lepaga, põlemisfaasi lõpus nelja halu lisamine			
	7	8	9	Keskmine	10	11	12	Keskmine
Summaarne emissioon, g	15,43	18,23	25,24	19,63	15,71	9,76	16,79	14,09
Algne kütuse mass, kg	5,03	5,54	5,44	5,34	5,23	5,34	5,26	5,28
Lisatud kütuse mass, kg	1	0,75	1,36	1,04	3	2,77	2,16	2,64
Kütuse mass, kg	6,03	6,29	6,8	6,38	8,23	8,11	7,42	7,92
Eriemissioon, g/kg	2,56	2,9	3,71	3,06±0,43	1,91	1,2	2,26	1,79±0,35

L2.10 LOÜ heitmed lepakütmisel põlemisfaasi lõpus kahe halu või nelja halu lisamisega

Katse	Külma ahju kütmine lepaga, põlemis faasi lõpus kahe halu lisamine				Külma ahju kütmine lepaga, põlemisfaasi lõpus nelja halu lisamine			
	7	8	9	Keskmine	10	11	12	Keskmine
Summaarne emissioon, g	3,48	5,06	8,13	5,56	2,17	1,42	5,82	3,14
Algne kütuse mass, kg	5,03	5,54	5,44	5,34	5,23	5,34	5,26	5,28
Lisatud kütuse mass, kg	1	0,75	1,36	1,04	3	2,77	2,16	2,64
Kütuse mass, kg	6,03	6,29	6,8	6,38	8,23	8,11	7,42	7,92
Eriemissioon, g/kg	0,58	0,81	1,2	0,86±0,21	0,26	0,18	0,79	0,41±0,20

L2.11 NO_x heitmed süütekatsel vanapaberiga ülevalt või alt süütamisel

Katse	Süütekatsel ülevalt vanapaberiga				Süütekatsel alt vanapaberiga			
	1	3	5	Keskmine	13	14	15	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	12,8	9,91	5,04	9,25±2,41	5,08	4,6	30,13	13,27±8,50
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	7,68	5,35	3,93	5,66±1,19	0,61	1,66	3,62	1,96±0,90
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	4,98	5,92	4,29	5,06

L2.12 SO₂ heitmed süütekatsel vanapaberiga ülevalt või alt süütamisel

Katse	Süütekatsel ülevalt vanapaberiga				Süütekatsel alt vanapaberiga			
	1	3	5	Keskmine	13	14	15	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	1,09	0,92	0,26	0,76±0,28	2,69	0,41	6,03	3,04±1,69
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	0,66	0,49	0,2	0,45±0,15	0,32	0,15	0,72	0,40±0,18
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	4,98	5,92	4,29	5,06

L2.13 CO heitmed süütekatsel vanapaberiga ülevalt või alt süütamisel

Katse	Süütekatsel ülevalt vanapaberiga				Süütekatsel alt vanapaberiga			
	1	3	5	Keskmine	13	14	15	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	27,0 3	22,04	18,52	22,53±3,0 7	36,88	46,21	68,5 6	50,55±10,2 7
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	16,2 2	11,9	14,45	14,19±1,7 1	4,43	16,64	8,23	9,76±3,69
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	4,98	5,92	4,29	5,06

L2.14 CH₄ heitmed süütekatsel vanapaberiga ülevalt või alt süütamisel

Katse	Süütekatsel ülevalt vanapaberiga				Süütekatsel alt vanapaberiga			
	1	3	5	Keskmine	13	14	15	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	1,12	1,33	0,81	1,09±0,18	2,5	1,48	4,58	2,85±0,95
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	0,67	0,72	0,63	0,67±0,07	0,3	0,28	0,55	0,46±0,09
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	4,98	5,92	4,29	5,06

L2.15 TOC heitmed süütekatsel vanapaberiga ülevalt või alt süütamisel

Katse	Süütekatsel ülevalt vanapaberiga				Süütekatsel alt vanapaberiga			
	1	3	5	Keskmine	13	14	15	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	4,22	4,93	1,94	3,70±0,96	4,94	3,79	13,54	7,42±3,14
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	2,53	2,66	1,52	2,24±0,41	0,59	1,36	1,62	1,19±0,33
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	4,98	5,92	4,29	5,06

L2.16 LOÜ heitmed süütekatsel vanapaberiga ülevalt või alt süütamisel

Katse	Süütekatsel ülevalt vanapaberiga				Süütekatsel alt vanapaberiga			
	1	3	5	Keskmine	13	14	15	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	2,64	3,05	0,81	2,17±0,74	1,41	1,72	7,27	3,47±1,95
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	1,58	1,65	0,63	1,28±0,36	0,17	0,62	0,87	0,55±0,21
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	4,98	5,92	4,29	5,06

L2.17 NO_x heitmed lepaga külma ahju kütisel avatud või suletud tuharestiga

Katse	Külma ahju kütmine lepaga, tuharest avatud				Külma ahju kütmine lepaga, tuharest suletud			
	1	3	5	Keskmine	16	18	20	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	12,8	9,91	5,04	9,25±2,41	2,79	3,22	4,08	3,36±0,47
Põlemisfaas	6,03	6,69	6,97	6,56±0,62	3,79	5,79	3,64	4,41±0,79
Kustumisfaas	6,17	3,96	3,02	4,38±1,01	1,53	8,88	1,76	4,06±2,44
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	7,68	5,35	3,93	-	1,17	1,16	1,71	-
Põlemisfaas	14,84	16,06	19,24	16,71±1,92	9,78	16,34	12,88	13,00±2,19
Kustumisfaas	7,03	7,85	5,43	-	5,42	30,89	5,18	-
Summaarne emissioon, g	29,56	29,26	28,6	29,14	16,37	48,39	19,77	28,18
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	4,87	6,2	4,84	5,3
Eriemissioon, g/kg	5,84	5,36	5,23	5,48±0,49	3,36	7,8	4,09	5,08±1,44

L2.18 SO₂ heitmed lepaga külma ahju kütisel avatud või suletud tuharestiga

Katse	Külma ahju kütmine lepaga, tuharest avatud				Külma ahju kütmine lepaga, tuharest suletud			
	1	3	5	Keskmine	16	18	20	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	1,09	0,9 2	0,2 6	0,76±0,28	0,2	0,16	0,21	0,19±0,03
Põlemisfaas	0,2	0,1 1	0,3	0,20±0,06	0,01	0,03	0,02	0,02±0,01
Kustumisfaas	1,37	0,1 8	0,3 6	0,64±0,38	0,21	3,66	0,22	1,36±1,16
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	0,66	0,4 9	0,2	-	0,09	0,06	0,09	-
Põlemisfaas	0,49	0,2 6	0,8 3	0,53±0,18	0,04	0,09	0,06	0,06±0,02
Kustumisfaas	1,56	0,3 6	0,6 6	-	0,73	12,72	0,65	-
Summaarne emissioon, g	2,7	1,1 2	1,6 8	1,84	0,86	12,86	0,79	4,84
Kütuse mass, kg	5,06	5,4 6	5,4 7	5,33	4,87	6,2	4,84	5,3
Eriemissioon, g/kg	0,53	0,2 1	0,3 1	0,35±0,11	0,18	2,07	0,16	0,80±0,64

L2.19 CO heitmed lepaga külma ahju kütisel avatud või suletud tuharestiga

Katse	Külma ahju kütmine lepaga, tuharest avatud				Külma ahju kütmine lepaga, tuharest suletud			
	1	3	5	Keskmine	16	18	20	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	27,0 3	22,0 4	18,5 2	22,53±3,0 7	14,02	17,16	20,71	17,30±2,3 9
Põlemisfaas	124, 49	83,0 3	116, 19	107,90±15 ,43	34,91	56,23	94,58	61,90±18, 17
Kustumisfaas	147, 66	147, 37	151, 16	148,73±12 ,19	86,04	237,9 9	97,27	140,44±50 ,21
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	16,2 2	11,9	14,4 5	-	5,89	6,18	8,7	-
Põlemisfaas	306, 23	199, 28	320, 69	275,40±44 ,39	90,06	158,5 5	334,8 2	194,48±74 ,62
Kustumisfaas	168, 33	291, 8	272, 1	-	304,59	828,2 2	285,9 7	-
Summaarne emissioon, g	490, 79	502, 98	607, 23	533,67	400,54	992,9 5	629,4 9	674,33
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	4,87	6,2	4,84	5,3
Eriemissioon, g/kg	96,9 9	92,1 2	111, 01	100,04±9, 93	82,25	160,1 5	130,0 6	124,15±24 ,84

L2.20 TOC heitmed lepaga külma ahju kütmisel avatud või suletud tuharestiga

Katse	Külma ahju kütmine lepaga, tuharest avatud				Külma ahju kütmine lepaga, tuharest suletud			
	1	3	5	Keskmine	16	18	20	Keskmine
Masskulu, mg/s								
Süütamisfaas	4,22	4,93	1,94	3,70±0,96	1,41	1,34	1,9	1,55±0,22
Põlemisfaas	1,75	3,08	3,73	2,86±0,63	1,83	1,86	2,15	1,95±0,20
Kustumisfaas	1,42	2,3	0,84	1,52±0,44	0,41	11,51	0,88	4,27±3,65
Mass perioodis, g								
Süütamisfaas	2,53	2,66	1,52	-	0,59	0,48	0,8	-
Põlemisfaas	4,31	7,4	10,3	7,34±1,84	4,72	5,24	7,63	5,86±1,03
Kustumisfaas	1,62	4,55	1,52	-	1,46	40,04	2,58	-
Summaarne emissioon, g	8,47	14,61	13,34	12,14	6,78	45,76	11	21,18
Kütuse mass, kg	5,06	5,46	5,47	5,33	4,87	6,2	4,84	5,3
Eriemissioon, g/kg	1,67	2,68	2,44	2,26±0,36	1,39	7,38	2,27	3,68±1,89